



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OBRÁBĚNÍ TĚŽKO OBRÁBITELNÝCH MATERIÁLŮ
DOKONČOVACÍMI TECHNOLOGIEMI**

FINISHING MACHINING OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Timotej Filípek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Timotej Filípek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů dokončovacími technologiemi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením těžkoobrobitelných materiálů, příčinami jejich zhoršené obrobitelnosti, návrhem experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocením.

Cíle diplomové práce:

Teoretický rozbor problému, literární rešerše.

Návrh experimentálních zkoušek obrábění těžkoobrobitelných materiálů dokončovacími technologiemi.

Realizace experimentů, jejich technologicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.

PÍŠKA, M., POLZER, A. Wear of coated solid carbide end mills when machining of hardened steels in dry conditions. In: Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.-22.5.2003. ISBN 80-7318-135-56.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005. pp. 651. ISBN 0-19-514206-3.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1. vyd., Slovensko, Trenčín, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

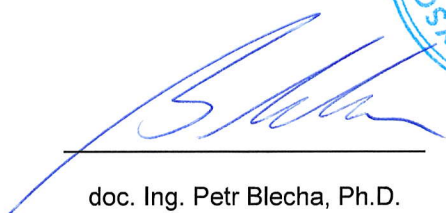
BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212. ISBN 80-8075-013-0.

MARINESCU, I. D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004. pp.724. ISBN 0-8155-1490-5.

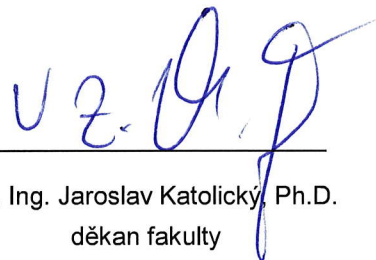
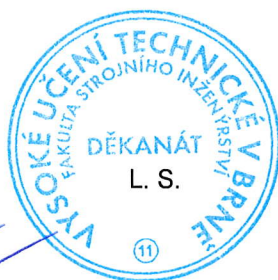
LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005. p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21.

V Brně, dne 23. 10. 2020



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca je zameraná na spracovanie ťažko obrobiteľných materiálov dokončovacími metódami obrábania. Prvá kapitola práce zahŕňa rozdelenie a charakteristiku dokončovacích technológií v oblasti obrábacích procesov. Ďalšia kapitola práce obsahuje rozdelenie a charakteristiku ťažko obrobiteľných materiálov. Súčasťou diplomovej práce je experimentálna časť, ktorá je zameraná na brúsenie prevažne ložiskových krúžkov z ťažko obrobiteľných materiálov. Cieľom experimentálnej časti je porovnanie a následné vyhodnotenie použitia viacerých druhov brúsiacich kotúčov pri brúsení daného materiálu obrobku. Skúmané sú viaceré parametre z technologicko-ekonomického hľadiska. Vyhodnotenie experimentálnej časti poskytuje prehľad o výhodách a nevýhodách použitia daných brúsiacich kotúčov pri brúsení daného materiálu pre sériovú výrobu. Záver obsahuje zhrnutie výsledkov experimentálnej časti.

Kľúčové slová

dokončovacie technológie, ťažko obrobiteľný materiál, brúsenie, ložiskový krúžok, antikorová oceľ, kalená oceľ

ABSTRACT

The Master's thesis focuses on processing of hard-to-machine materials by the finishing machining methods. The first chapter comprises division and characteristics of finishing technologies in the field of machining processes. The chapter following includes division and characteristics of the hard-to-machine materials. The experimental part – another significant part of the thesis – is focused on grinding of mostly bearing rings made of hard-to-machine materials. The aim of the experimental part is to compare and subsequently assess the use of various kinds of grinding wheels in the grinding process of a given workpiece material. Several parameters are examined from the technological and economic point of view. The assessment of the experimental part provides an overview on the advantages and disadvantages of the use of the grinding wheels in the grinding process of a given material for large-scale production. The conclusion is a summary of the results obtained in the experimental part.

Key words

finishing machining methods, hard-to-machine materials, grinding, bearing ring, stainless steel, hardened steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FILÍPEK, Timotej. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů dokončovacími technologiemi*. Brno 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 61 s. Vedúci práce Miroslav Píška

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů dokončovacími technologiemi** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

20.5.2021

Dátum

Bc. Timotej Filípek

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi prof. Ing. Miroslavovi Píškovi, CSc., za nespočetné rady a čas, ktorý mi venoval. Ďalej by som chcel poďakovať pánom Ing. Petrovi Caletkovi a Miroslavovi Krušinovi, ktorí mi poskytovali dáta a zabezpečili vypracovanie experimentálnej časti vo firme Schaeffler Skalica, spol. s r.o. a za ich pomoc pri celkovom vypracovaní práce. Na záver by som rád poďakoval svojej rodine a všetkým, ktorí mi pomohli v štúdiu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PREHLÁSENIE.....	4
POĎAKOVANIE	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	9
1 Dokončovacie technológie v obrábaní.....	10
1.1 Abrazívne metódy.....	10
1.1.1 Brúsenie	10
1.1.2 Materiály brúsiacich kotúčov.....	11
1.1.3 Lapovanie.....	12
1.1.3.1 Materiály lapovacích nástrojov	12
1.1.4 Honovanie	13
1.1.4.1 Materiály honovacích nástrojov.....	14
1.1.5 Superfinišovanie	14
1.1.5.1 Materiály superfinišovacích nástrojov	15
1.2 Špeciálne dokončovacie technológie	15
2 Rozdelenie ťažko obrobitelných materiálov	18
2.1 Charakteristika ťažko obrobitelných materiálov (TOM)	18
2.1.1 Kalené ocele.....	18
2.1.2 Antikorové ocele.....	23
2.1.3 Titánové zliatiny	25
2.1.4 Superzliatiny	28
2.2 Príčiny zhoršenej obrobitelnosti.....	29
3 Návrh experimentálnej časti	30
3.1 Schaeffler, spol. s r.o.	30
3.2 Návrh experimentálnej časti	30
3.3 Použitý stroj pre experimentálnu časť	30
3.3.1 Otvorová brúska Novamatic 2G	30
3.3.2 Bezhrtová brúska Jupiter	31
3.4 Použitý BK pre experimentálnu časť	32
3.4.1 BK Schmeier.....	32
3.4.2 BK 3M	33
3.4.3 BK Hermes	33
3.4.4 BK Saint Gobain (SG)	33

3.4.5 BK Tyrolit.....	33
3.5 Použité obrobky pre experimentálnu časť	33
3.5.1 Obrobok 1	34
3.5.2 Obrobok 2	35
3.5.3 Obrobok 3	37
4 Realizácia experimentálnej časti.....	38
4.1 Priebeh experimentálnej časti	38
4.2 Brúsenie obrobku 1	38
4.3 Brúsenie obrobku 2.....	41
4.4 Brúsenie obrobku 3	44
5 Vyhodnotenie experimentálnej časti.....	47
5.1 Obrobok 1	47
5.1.1 Hodnoty technologických parametrov	47
5.1.1.1 Drsnosť povrchu Ra.....	47
5.1.1.2 Priamosť.....	50
5.1.1.3 Kruhovitosť a teplotná kompenzácia po brúsení	50
5.1.1.4 Životnosť BK	51
5.1.2 Hodnoty produkčných parametrov	51
5.1.2.1 Reálny cyklový čas	51
5.1.2.2 Nepodarky.....	51
5.1.3 Hodnoty ekonomických parametrov	52
5.1.3.1 Cena BK.....	52
5.1.3.2 Sadzba prevádzky stroja	52
5.1.3.3 Cena brúsenia 1 ks obrobku.....	52
5.1.3.4 Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov	52
5.2 Obrobok 2	52
5.2.1 Hodnoty technologických parametrov	53
5.2.1.1 Drsnosť povrchu	53
5.2.1.2 Priamosť, kruhovitosť, teplotná kompenzácia po brúsení	53
5.2.1.3 Životnosť BK	53
5.2.2 Hodnoty produkčných parametrov	53
5.2.2.1 Reálny cyklový čas	53
5.2.2.2 Nepodarky.....	54
5.2.3 Hodnoty ekonomických parametrov	54
5.2.3.1 Cena BK.....	54

5.2.3.2 Sadzba prevádzky stroja	54
5.2.3.3 Cena brúsenia 1 ks obrobku.....	54
5.2.3.4 Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov	54
5.3 Obrobok 3	54
Záver	56
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	57
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	61

ÚVOD

Technologický pokrok je v súčasnej dobe veľmi výrazný. Väčšina odvetví napreduje vo všetkých smeroch a výnimku netvorí ani materiálovo-technologické odvetvie. Materiály podliehajú výskumom a následným pokusom o zlepšenie ich vlastností. Materiály sa zdokonaľujú úpravou chemického zloženia (zvyšovaním a znižovaním obsiahnutých prvkov, pridávaním legúr), tepelným a chemicko-tepelným spracovaním (kalenie do rôznych médií, cementácia, nitridizácia), tvárnením a mnohými ďalšími technológiami. Vylepšovanie fyzikálnych a mechanických vlastností materiálov však zhoršuje ich obrobitelnosť a kladie vyššie nároky na obrábacie technológie. Výnimku netvorí ani dokončovacie technológie obrábania (brúsenie, honovanie, lapovanie, superfinišovanie, leštenie). Preto sa táto diplomová práca venuje problematike dokončovacích operácií u ťažko obrobitelných materiálov.

Ťažko obrobitelné materiály svojimi vlastnosťami ponúkajú široké pásmo uplatnenia v rôznych priemyselných odvetviach. Tieto materiály si zachovávajú svoje výborné mechanické a fyzikálne vlastnosti aj v agresívnych prostrediach, či ako ťažko namáhané súčiastky. Preto sú z hľadiska bezpečnosti a životnosti hojne využívané. Nevýhodou je práve ich zhoršená obrobitelnosť v porovnaní s konvenčnými materiálmi.

Dokončovacích technológií existuje množstvo, avšak najrozšírenejšou z nich je brúsenie. Brúsenie má svoje zastúpenie v drvivej väčšine priemyselných odvetví. V súčasnosti je vyvinuté veľké množstvo brúsiacich nástrojov, ktoré sa od seba líšia tvarom, použitím, materiálom a kinematikou. Najvyužívanším brúsiacim nástrojom je v súčasnosti brúsiaci kotúč (BK). Experimentálna časť diplomovej práce sa preto zaoberá brúsením daných obrobkov brúsiacimi kotúčmi.

Experimentálna časť skúma dosiahnuté výsledky pri brúsení ťažko obrobitelných materiálov. Súčasťou experimentu je taktiež porovnanie viacerých brúsiacich kotúčov pri brúsení obrobku z daného materiálu. Experiment prebehol v spoločnosti Schaeffler Skalica, pretože brúsenie (najmä ložiskových komponentov) tvorí väčšinu výroby. Experiment je zameraný na produktivitu a ekonomické hľadisko, keďže výroba valivých ložísk v tejto spoločnosti sa radí do veľkosériovej výroby. Z toho dôvodu sa kladie dôraz práve na produktivitu a ziskovosť výroby. Výstupom experimentálnej časti sú výhody použitia daných brúsiacich kotúčov na daných strojoch pri daných rezných parametroch.

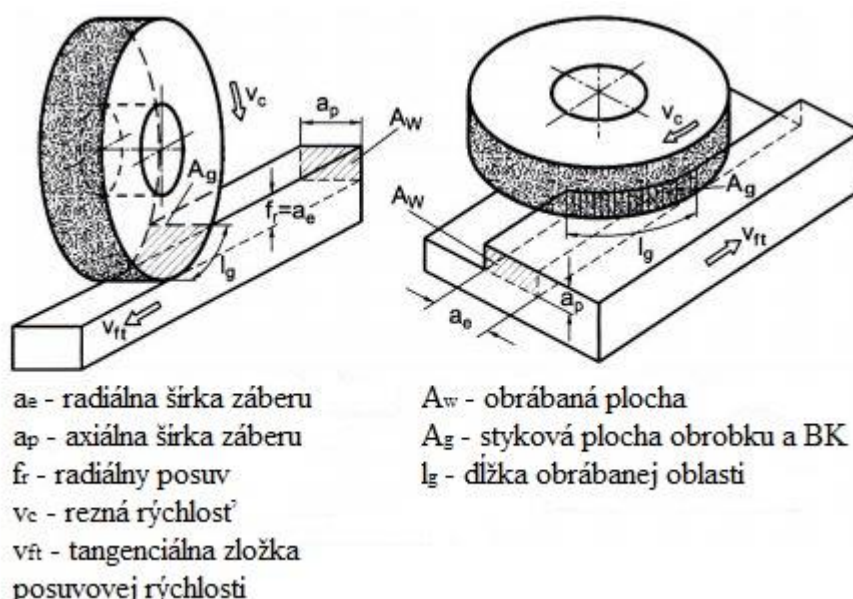
1 DOKONČOVACIE TECHNOLOGIE V OBRÁBANÍ

1.1 Abrázívne metódy

Abrázívne metódy obrábania sú charakteristické tým, že dochádza k úberu materiálu obrobku formou triesky pomocou nástroja, ktorý obsahuje abrazívne zrná daného materiálu. Tieto metódy sa delia na konvenčné a nekonvenčné.

1.1.1 Brúsenie

Brúsenie je najrozšírenejšou metódou dokončovacích procesov obrábania. Pri brúsení je odoberaná malá časť materiálu obrobku (malá trieska) brúsiacim nástrojom, ktorý nemá definovanú reznú geometriu. Existujú však brúsiace nástroje, ktoré majú špeciálne tvarované abrazívne zrná (napríklad brúsiace kotúče, ktoré majú zrná v tvare trojuholníka). Hlavný pohyb je vo väčšine prípadov rotačný a koná ho nástroj. Vedľajší pohyb je najčastejšie translačný a konáť ho môže nástroj aj obrobok. Ako brúsiaci nástroj väčšinou slúži brúsiaci kotúč (BK). BK môže mať rôzne tvary, rozmery, materiál brusiva a spojiva. Brúsiaci nástroj však môže byť aj vo forme brúsiaceho pásu, kameňa, papiera alebo vo forme pilníka. Brúsenie sa používa na dokončovanie takmer všetkých typov materiálov (železné a neželezné kovy, drevo, plasty, betóny). Brúsky sa delia podľa typu obrábanej plochy a podľa typu upnutia obrobku (rovinná, hrotová a bezhrotová, otvorová, stojanová). Kvalita povrchu však závisí od viacerých kritérií, napr. vyváženie BK, použitá procesná kvapalina, interval zrovnávania BK, nastavenie procesných parametrov [1, 2, 3, 4].



Obr. 1 Technológia brúsenia obvodom kotúča (vľavo) a čelom kotúča (vpravo) [5]

1.1.2 Materiály brúsiacich kotúčov

BK sa skladá z dvoch základných typov materiálov. Prvým typom sú materiály spojiva a druhým materiály brusiva. Hlavnou funkciou spojivového materiálu je „lepenie“ jednotlivých abrazívnych zŕn k sebe. Spojivo však pohlcuje rázy vzniknuté pri brúsení a taktiež odoláva chemickým účinkom. Medzi najpoužívanejšie materiály spojív patria [2, 5, 6]:

Živicové (bakelitové) spojivo – základom tohto typu spojiva je fenolová živica, ktorá sa vytvrdzuje približne pri 180 °C. Výhodou tohto spojiva je dobrá odolnosť proti rázom a teplotnému namáhaniu. Nevýhodou je chemická nestálosť (pH pracovného prostredia nesmie klesnúť pod hodnotu 9). Využíva sa najmä pre jemné brúsenie a brúsenie za sucha.

Keramické spojivo – základom tohto spojiva je kremeň, kaolín a živec. Vytvrdzovanie BK s týmto spojivom prebieha za vysokých teplôt (900 °C, prípadne až do 1400 °C). Keramické spojivo je viac používané, pretože je chemicky stále a nedochádza k zníženiu požadovaných vlastností vplyvom dlhšieho skladovania. Je však citlivé na teplotné namáhanie a namáhanie rázom.

Kovové spojivo – používa sa u BK s diamantovým abrazívnym zrnom.

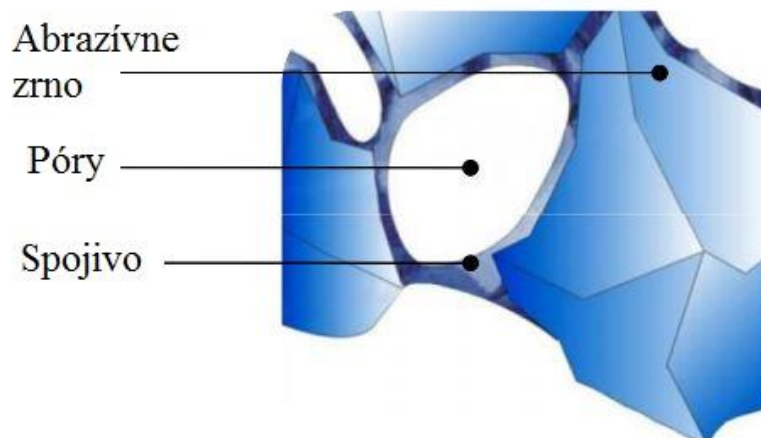
Abrazívne zrná zabezpečujú odoberanie materiálu obrobku. Voľba materiálu abrazívnych zŕn je ovplyvnená viacerými faktormi (materiál obrobku, typ brúsenia, rezné parametre, typ procesnej kvapaliny). Najrozšírenejšie typy materiálu abrazívnych zŕn sú [2, 6]:

Korund (Al_2O_3) – v praxi sa používa viacero druhov korundov, ktoré sa líšia farebným označením (biely, červený, ružový, hnedý). Korund sa vyrába z bauxitu, ktorý je za zvýšenej teploty zbavený vody, pridáva sa malé množstvo železných triesok a zemného koksu. Táto zmes sa následne roztaví v indukčných peciach a jadrá oxidu hlinitého sa odoberajú a spracúvajú na tvorbu abrazívnych zŕn. Na vylepšenie abrazívnych vlastností sa korund spečuje. Korund je vhodný na brúsenie tvrdších materiálov s vysokou pevnosťou (nástrojové a vysoko legované ocele).

Karbid kremíka – základom tohto typu materiálu je kremičitý piesok s ropným koksom (pridať sa môže malé množstvo železných triesok na zvýšenie pórovitosti a NaCl). Táto zmes je v peci roztavená pri teplote nad 2000 °C a následne začne proces kryštalizácie, kedy vznikajú abrazívne zrná. Karbid kremíka sa používa pri brúsení materiálov s nižšou pevnosťou (liatina, hliník, meď, drevo).

Kubický nitrid bóru (CBN) – zrná kubického nitridu bóru vznikajú pri syntéze atómov bóru a dusíka. Syntéza prebieha za vysokého tlaku a teploty z hexagonálneho nitridu bóru v kryštalickej forme. Kubický nitrid bóru je možné použiť pre obrábanie takmer každého materiálu, pretože jeho mechanické vlastnosti sú podobné diamantu.

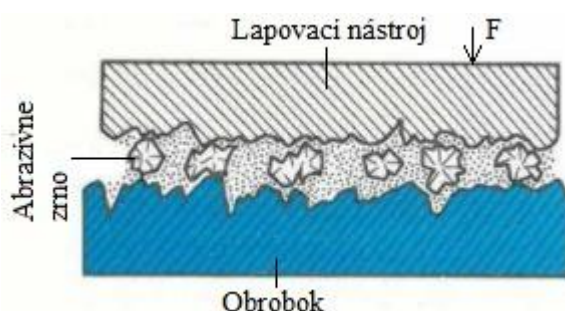
Polysyntetický a syntetický diamant – vzniká z uhlíka vo forme grafitu počas pôsobenia veľmi vysokého tlaku a teploty.



Obr. 2 Štruktúra BK [7]

1.1.3 Lapovanie

Lapovanie je jednou z dokončovacích technológií obrábania. Lapovanie je možné vykonávať ručne aj strojne. Pri lapovacom procese sa na plochu obrobku nanesie lapovacia pasta, ktorá obsahuje abrazívne zrná. Následne je táto vrstva pritláčaná k ploche obrobku určitou tlakovou silou, čím dochádza k jemnému úberu materiálu obrobku. Obrobok najčastejšie koná rotačný pohyb, lapovací nástroj koná translačný pohyb alebo ORP. V praxi sa lapovací proces používa na dokončenie veľmi presných plôch obrobku, napr. ventily, pumpy, ústia zbraní, procesory počítačov. Hodnota drsnosti povrchu po lapovaní dosahuje hodnoty v desiatkach až jednotkách nanometrov. Mimo konvenčného typu lapovania sa používa aj magnetické a ultrazvukové lapovanie a tiež lapovanie pomocou vodného lúča [8, 9, 10].



Obr. 3 Technológia lapovania [10]

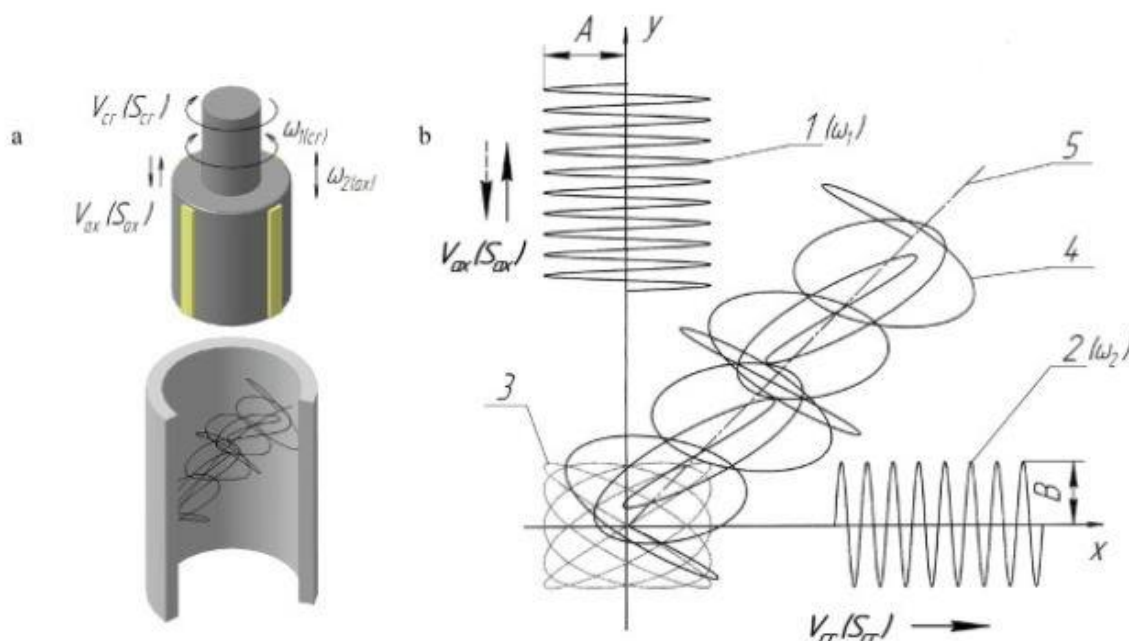
1.1.3.1 Materiály lapovacích nástrojov

Lapovacím nástrojom je abrazívna pasta (prípadne kvapalina). Abrazívna pasta vzniká zmiešaním oleja s vyššou hustotou alebo parafínom s malými čiastočkami (zrnami) s abrazívnymi vlastnosťami. Najčastejšie sa používajú abrazívne zrná syntetického diamantu (vo forme prášku), karbidu kremíka a korundu. Pre veľmi jemné lapovanie sa používa aj oxid chrómu Cr_2O_3 , oxid železitý Fe_2O_3 a hydroxid železitý FeOH_3 . Lapovací proces veľmi ovplyvňuje tiež veľkosť abrazívnych zrn. Lapovací nástroj, ktorý pritláča abrazívnu pastu k ploche obrobku môže mať rôzne tvary, napr. kotúč, trň, puzdro. Prítlačný nástroj je zväčša vyrobený z kalenej a nekalenej ocele, medi, bronzu, liatiny, prípadne plastu [8, 9, 10].

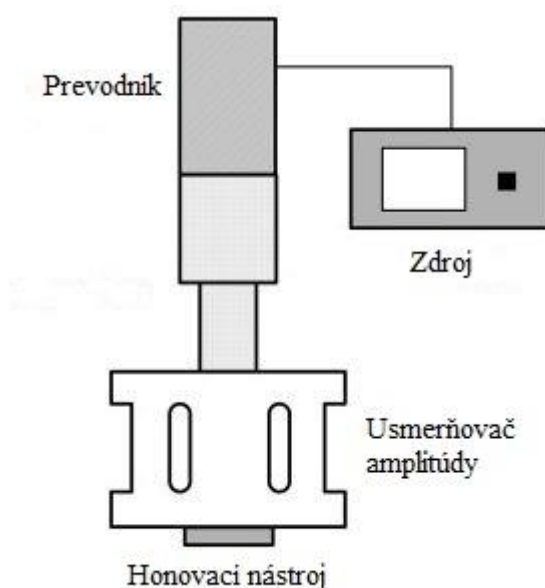
1.1.4 Honovanie

Honovanie je jednou z najrozšírenejších technológií dokončovacích metód obrábania v oblasti strojárstva. Pomocou honovania je možné dokončiť vonkajšie aj vnútorné valcové plochy na hodnotu drsnosti povrchu R_a až $0,1 \mu\text{m}$. V súčasnosti sa používa viacero typov kinematiky honovania. Medzi najpoužívanéjšie typy honovania z pohľadu kvality, produktivity a ekonomickosti patrí rastrové honovanie a ultrazvukové honovanie. Rastrové honovanie je charakteristické zložitou a neopakovateľnou trajektóriou nástroja pri obrábacom procese. Kinematiku rastrového honovania opisuje obrázok 4. Obrázok 4b opisuje pohyby nástroja premietnutých do roviny. Popisky č. 1 a 2 predstavujú kmitavý pohyb v radiálnom a axiálnom smere. Popisok č. 3 predstavuje nerozloženú trajektóriu pohybu nástroja bez vratných pohybov V_{ax} a V_{cr} . Popisok č. 4 predstavuje výslednú trajektóriu pohybu nástroja. Výsledný pohyb je v podstate časť 3 rozložená v smere špirály č. 5. Trajektória sa teda dá nazvať ako rastrová cykloidná [11, 12, 13].

Ultrazvukové honovanie má podobný princíp ako rastrové honovanie, ktorý spočíva vo využití rotačného pohybu nástroja s kmitavým pohybom malej amplitúdy. Tento typ honovania však vyžaduje zložitejšie vybavenie. Okrem generátora kmitania je potrebný aj špeciálny kváder, ktorý usmerňuje veľkosť amplitúdy v priečnom a pozdĺžnom smere. Honovanie sa využíva najmä v presnom strojárstve, napr. výroba ložísk, spaľovacie motory [11, 12, 13].



Obr. 4 Kinematika rastrového honovania. Obrázok a) opisuje smery pohybu honovacieho nástroja, obrázok b) obsahuje premietnutie vykonávaných pohybov do roviny [11]



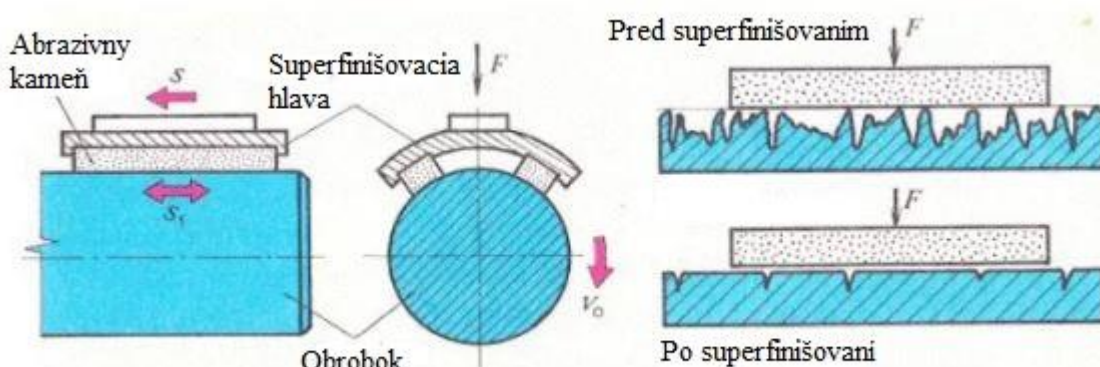
Obr. 5 Schéma ultrazvukového honovacieho stroja [12]

1.1.4.1 Materiály honovacích nástrojov

Nástrojom pri honovacom procese je väčšinou honovací kameň. Honovací kameň môže mať rôzne veľkosti a tvary prispôsobené obrobku a spôsobu honovania. Hlavnými parametrami honovacích kameňov sú materiál kameňa a veľkosť abrazívnych zŕn. Pri honovaní platí pravidlo, čím jemnejšie zrna, tým lepšia kvalita obrobeného povrchu. Pre honovanie konvenčných materiálov sa používajú nástroje z karbidu kremíka alebo korundu. Pre honovanie ťažko obrobitelných materiálov sa využívajú nástroje z kubického nitridu bóru a syntetického diamantu. V kombinácii s vhodne zvolenými parametrami obrábania (veľkosť zrna, typ honovania, doba honovania) je možné splniť veľmi prísne požiadavky na kvalitu povrchu pri zachovaní vysokej produktivity a vysokej trvanlivosti nástroja [11, 12, 13].

1.1.5 Superfinišovanie

Superfinišovanie je jednou z dokončovacích technológií obrábania, pomocou ktorej je dosahovaná hodnota drsnosti povrchu v desiatkach nanometrov. Vo väčšine prípadov sa táto technológia používa na dokončovanie vonkajších valcových plôch (hriadele, čapy, časti hydraulických zariadení a valivé komponenty ložísk). Princíp tejto technológie spočíva v kmitavom pohybe nástroja, ktorým najčastejšie býva superfinišovacia hlava. Obrobok je upnutý medzi hrotmi a superfinišovacia hlava vykonáva translačný pohyb doplnený o kmitavý pohyb. Kmitaním je docielené, že trajektórie nástroja sa prekrývajú a tým je dosiahnutá väčšia kvalita povrchu. Súčasťou superfinišovacej hlavy sú kamene, ktoré sú nositeľmi abrazívnych vlastností a zabezpečujú úber materiálu. Pri superfinišovaní je väčšinou použitá procesná kvapalina vo forme minerálnych a syntetických olejov, prípadne petroleja. Touto technológiou je možné dokončovať takmer všetky typy materiálov, najčastejšie kalenú a nekalenú ocel, liatinu, neželezné kovy [13, 14, 15, 16].



Obr. 6 Technológia superfinišovania [16]

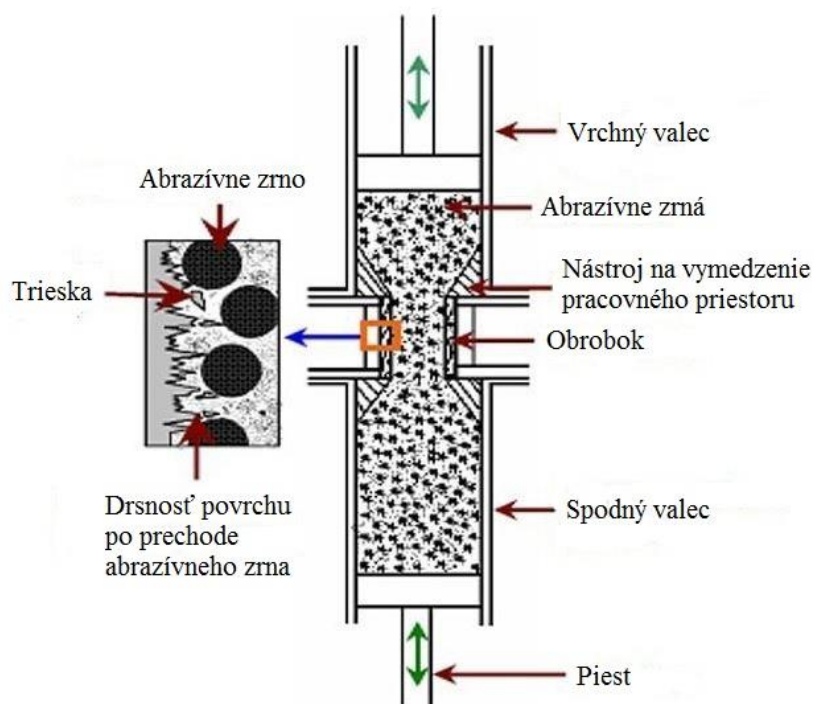
1.1.5.1 Materiály superfinišovacích nástrojov

Abrazívny kameň, ktorý je súčasťou superfinišovacej hlavy je najčastejšie vyrobený z karbidu kremíka alebo korundu. Pri špeciálnych druhoch materiálov obrobku môže byť použitý aj kubický nitrid bóru (CBN) alebo syntetický diamant. Abrazívne zrná sú spájané keramickým alebo bakelitovým (živicovým) spojivom. Podobne ako pri technológii brúsenia, aj pri superfinišovaní platí, že pre obrábanie tvrdých materiálov sa volí mäkký kameň a pre obrábanie mäkkých materiálov sa volí tvrdý kameň [13, 16].

1.2 Špeciálne dokončovacie technológie

S vývojom materiálov a postupným zvyšovaním nárokov na kvalitu povrchu obrobku prišlo k vývoju dokončovacích technológií obrábania. Na obrábanie ťažko obrábiteľných materiálov (sklo, keramika, diamant) sa preto zaviedli špeciálne dokončovacie technológie. Medzi tieto technológie patria: Abrasive Flow Finishing (AFF), Chemical Mechanical Polishing (CMP), Elastic Emission Machining (EEM), Magnetic Abrasive Finishing (MAF), Magnetorheological Finishing (MRF) a Plasma Assisted Polishing (PAP). Uvedené technológie pracujú s presnosťou hodnoty drsnosti povrchu v nanometroch, a preto sa často označujú ako leštiace technológie [17].

Metóda AFF pracuje s polymérnym médiom vo forme „pasty“, ktorá obsahuje abrazívne zrná (karbid kremíka) rôznych veľkostí. Princíp spočíva vo vtláčaní tejto pasty pomocou piestu k povrchu obrobku, a tým dochádza k jemnému obrábaniu. Výhodou tejto metódy je znovu použiteľný nástroj, ktorý je vedený späť do zásobníka a je cyklicky vtláčaný do pracovného priestoru. Rezné sily sú pri tomto procese obrábania taktiež riadené samovoľne pomocou nastavení parametrov stroja [17, 18].

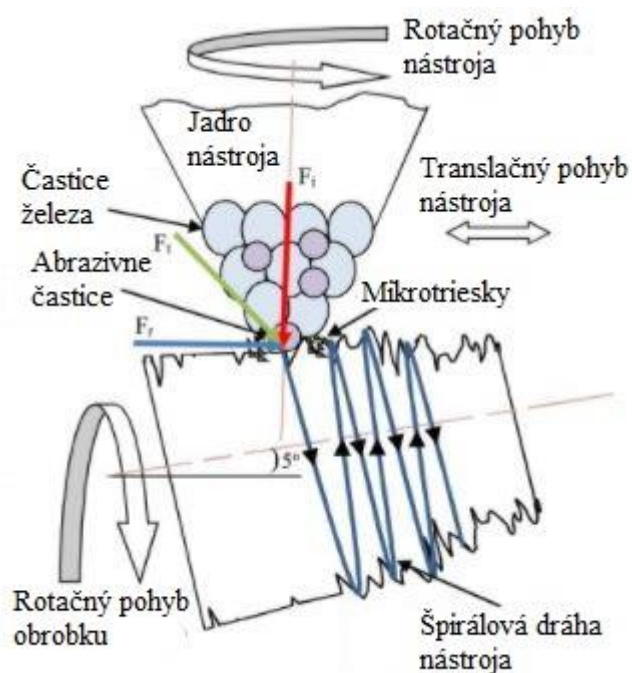


Obr. 7 Technológia AFF [19]

Metóda CMP je zložitý fyzikálno-chemický proces, ktorý kombinuje mechanické a chemické interakcie medzi obrobkom a nástrojom. Táto technológia sa neustále vyvíja, pretože optimálne zvolenie chemického mechanizmu v závislosti na materiáli je náročná úloha. Princíp tejto technológie spočíva v trení medzi pracovnou podložkou, na ktorej je umiestnený obrobok, a pracovnou membránou, ktorá je uchytená na držiaku za účasti daných chemických prísad vo forme „kaše“. Pracovná podložka s obrobkom a taktiež membránový držiak konajú rotačný pohyb, avšak nejde o identické rýchlosti rotácie. Ako oxidačné činidlo sa často používa peroxid vodíka (H_2O_2), nositeľ abrazívnych vlastností v procese býva kremík vo viacerých formách (karbid kremíka SiC , oxid kremičitý SiO_2). Teplo generované trením zosilňuje chemické účinky, čím zjednodušuje a urýchľuje proces obrábania [17, 20].

Metóda MAF je jednou z nekonvenčných dokončovacích technológií obrábania, ktorá využíva magnetické pole a sily na odoberanie materiálu. Obrobok je umiestnený medzi dva rotujúce elektromagnety. V medzere medzi elektromagnetmi sú umiestnené abrazívne častice, ktoré vplyvom magnetického poľa utvoria tzv. magnetickú kefu, ktorá plní úlohu obrábacieho nástroja. Výhodou tejto metódy je veľmi nízke riziko vzniku mikrotrhlín na povrchu obrobku, pretože tu nedochádza k tlaku nástroja na obrobok [17, 21].

Metóda MRF podobne ako metóda MAF využíva magnetizmus počas procesu obrábania. Nástroj má tvar hrotu, ktorý je tvorený jadrom a stuhnutou magnetoreologickou tekutinou. Táto tekutina obsahuje častice železa a abrazívne častice (karbidy). Magnetická sila častíc železa tlačí abrazívne častice k hranici hrotu (do prostredia styku s obrobkom) ako je znázornené na obrázku č. 8. Nástroj koná rotačný a zároveň translačný pohyb, obrobok koná rotačný pohyb. Z tohto dôvodu je dráha častíc nástroja v tvare špirály [17, 21].



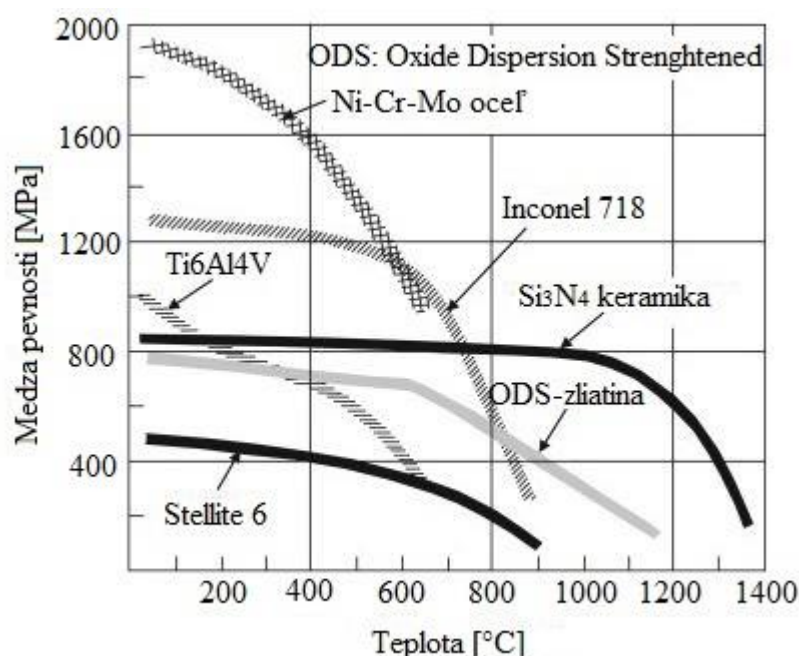
Obr. 8 Technológia MRF [21]

Metóda PAP je založená na pôsobení plazmového lúča pri atmosférickom tlaku. Princíp tejto metódy spočíva vo vytvorení mäkkej vrstvy na povrchu obrobku pôsobením plazmového lúča a následným odstránením tejto vrstvy pomocou abrazívnej fólie, ktorá je umiestnená na rotujúcom vretene a je pritláčaná k povrchu obrobku. Plazmový lúč je vytvorený pomocou vysokofrekvenčnej energie. Ako procesný plyn sa používa vodná para na báze hélia (2% He). Materiálov elektródy je viacero (napr. meď, hafnium) [22].

2 ROZDELENIE ŤAŽKO OBROBITEĽNÝCH MATERIÁLOV

2.1 Charakteristika ťažko obrobitelných materiálov (TOM)

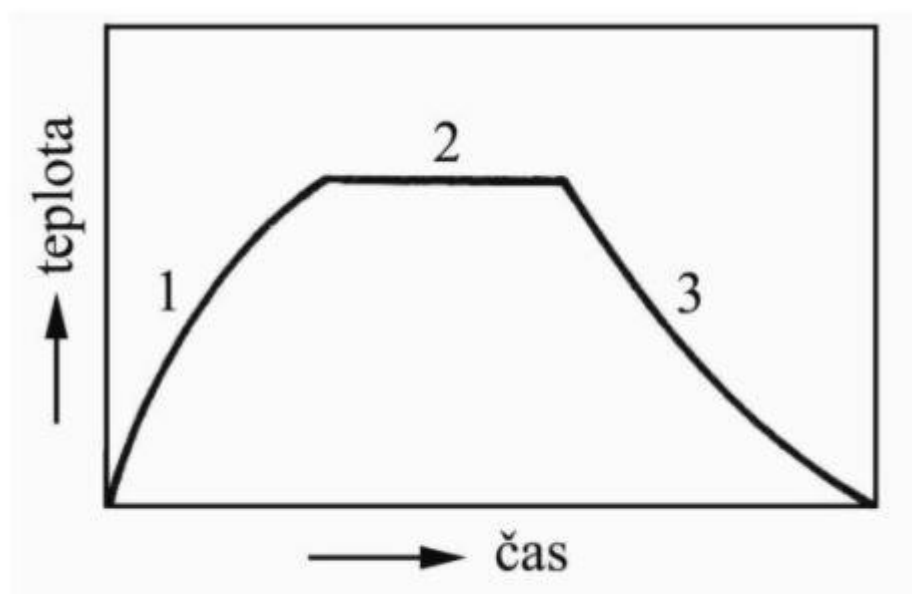
Materiál, ktorý je označený ako ťažko obrobitelný má vlastnosti, ktoré vo veľkej miere zhoršujú obrobitelnosť, zvyšujú energetickú náročnosť procesu obrábania a znižujú ekonomickosť výrobného procesu. Index obrobitelnosti je oproti materiálom, ktoré nie sú zaradené medzi ťažko obrobitelné materiály, značne nižší. Obrábací proces týchto materiálov je sprevádzaný vyšším opotrebením nástroja, vznikom vyššej teploty v pracovnom prostredí a tým vznikajúce vyššie teplotné namáhanie sústavy S-N-O, vyšším silovým zaťažením nástroja, vyššími trecími silami medzi nástrojom a obrobkom a odchádzajúcej triesky, nižšou kvalitou obrobeného povrchu. Medzi ťažko obrobitelné materiály patria tieto materiály: kalené ocele, antikorové ocele, zliatiny titánu, zliatiny niklu, zliatiny horčíka, kompozitné materiály, keramika, zliatiny kobaltu a chrómu, zliatiny platiny, materiály vyrobené práškovou metalúrgiou (spekané karbidy), superzliatiny [1, 24, 25, 26].



Obr. 9 Závislosť medze pevnosti na teplote TOM [26]

2.1.1 Kalené ocele

Kalenie (martenzitické, bainitické, povrchové) je proces tepelného spracovania, pri ktorom sa materiál ohrieva nad teplotu A_{c3} (prípadne A_{c1}). Po ohreve a danej výdrži na tejto teplote nasleduje rýchle ochladenie do kaliaceho média (olej, voda, vzduch), čím sa dosahuje martenzitická alebo bainitická štruktúra materiálu. Táto štruktúra zvyšuje tvrdosť, únavovú pevnosť a odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Medzi kalené ocele sa zaraďujú všetky typy ocelí, ktoré sú vyhovujúce pre tepelné spracovanie. Kritériom pre vyhovujúce prevedenie procesu kalenia je obsah uhlíka. Odborná literatúra uvádza ako hranicu kaliteľnosti obsah uhlíka nad 0,35 %. Niektoré legujúce prvky posúvajú túto hranicu k nižším hodnotám obsahu uhlíka, teda zlepšujú schopnosť kaliteľnosti materiálu. Ďalšími faktormi, ktoré ovplyvňujú mechanické vlastnosti materiálu po kalení sú veľkosť zŕn austenitu pri ohreve a taktiež jeho homogenita [27 – 30].

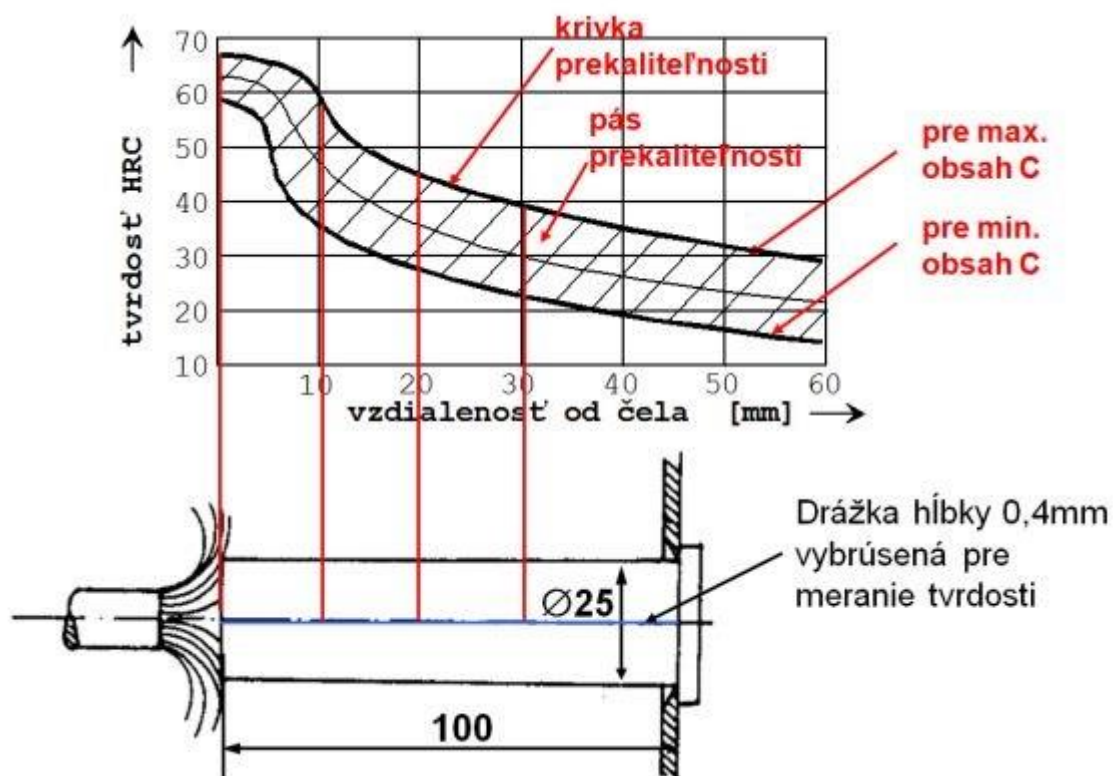


1 - ohrev, 2 - výdrž na teplote, 3 - ochladzovanie

Obr. 10 Princíp tepelného spracovania [28]

Zakaliteľnosť materiálu je najvyššia možná hodnota tvrdosti dosiahnutá kalením.

Prekaliteľnosť materiálu určuje maximálnu vzdialenosť od povrchu materiálu, kde je viditeľné zlepšenie mechanických vlastností kalením. Prekaliteľnosť materiálu ovplyvňuje typ kaliačeho prostredia a taktiež tepelná vodivosť materiálu. Najčastejšie sa stanovuje pomocou Jominyho skúšky. Princíp tejto skúšky je v ohreve a výdrži na kaliaču teplotu a následnom ochladení čela obrobku. Čelo sa následne odbrusuje do určitej vzdialenosti od povrchu a skúma sa dosiahnutá tvrdosť. Skúšku je nutné opakovať pre daný materiál, pretože chemické zloženie a štruktúra sa môže meniť. Tieto merania sa vynesú do Grafu závislosti tvrdosti na vzdialenosti od čela a stanoví sa pás prekaliteľnosti, ktorý zahŕňa aj výslednú krivku prekaliteľnosti. S prekaliteľnosťou úzko súvisí aj diagram ARA (anizotermický rozpad austenitu). ARA diagram určuje rýchlosť ochladzovania v závislosti od dosiahnutej štruktúry materiálu. ARA diagram taktiež zahŕňa vplyv legujúcich prvkov, ktoré predlžujú dobu premeny austenitu na martenzit, prípadne bainit [27 – 30].



Obr. 11 Diagram prekaliteľnosti [27]

- 1) **Martenzitické kalenie** – spočíva v ohreve na kaliacu teplotu, výdržou na tejto teplote a následným prudkým ochladením. Pri padeutektoidných oceliach vzniká martenzitická štruktúra s malým obsahom zvyškového austenitu, pri nadeutektoidných oceliach vzniká martenzitická štruktúra s vyšším obsahom zvyškového austenitu a sekundárnym cementitom. Rýchlosť ochladzovania sa stanovuje pomocou ARA diagramu a je vyššia ako kritická rýchlosť ochladzovania. Martenzitické kalenie sa delí na: nepretržité, lomené, termálne, so zmrazovaním [27, 30].

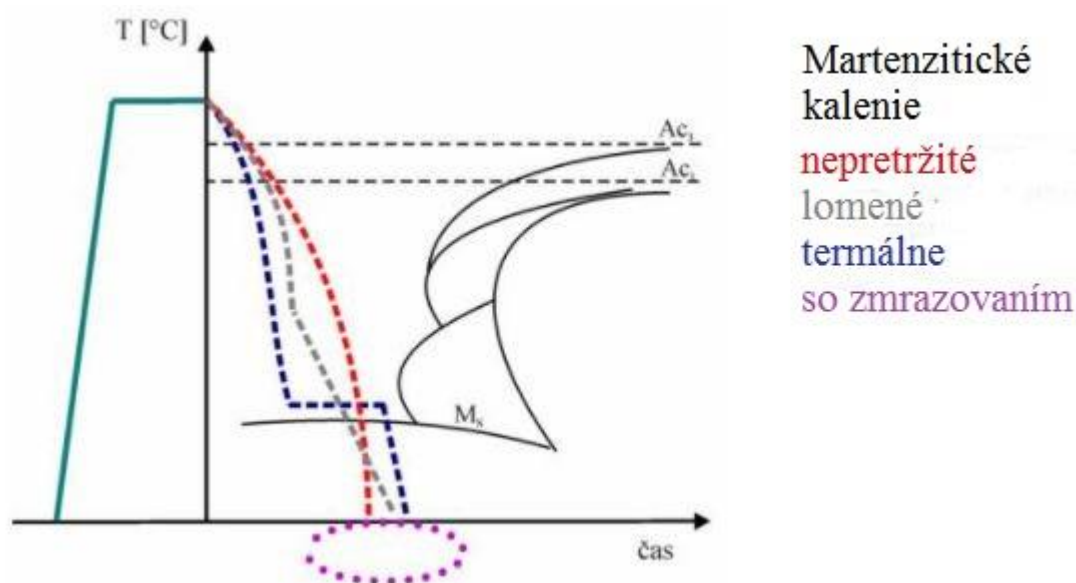
Nepretržité kalenie – ide o najjednoduchší spôsob kalenia. Princíp je v ohreve na kaliacu teplotu a následnom prudkom ochladení v kaliacom prostredí. Dosahuje sa veľmi vysokých tvrdostí, avšak vznikajú veľmi vysoké vnútorné napätia a deformácie. Z tohto dôvodu nie je možné kalit' týmto spôsobom tvarovo zložité súčiastky [27, 30].

Lomené kalenie – rozdiel v porovnaní s nepretržitým kalením je v ochladzovaní súčiastky. Po ohreve a výdržu na kaliacej teplote je daná súčiastka prudko ochladená (vo vode), aby neprišlo k difúznemu rozpadu austenitu. Následne je súčiastka ochladzovaná nižšou rýchlosťou (v oleji) až na teplotu M_f . Výhodou tohto typu kalenia je vznik nižších vnútorných napätí a deformácií. Je však potrebné poznať ARA diagram daného materiálu [27, 30].

Termálne kalenie – uskutočňuje sa ochladením z kaliacej teploty na teplotu o pár desiatok vyššiu ako je teplota M_s a následnou výdržou na tejto teplote (výdrž nemôže byť príliš dlhá, pretože by mohla nastať tvorba bainitu). Po výdržu nasleduje

pozvoľné ochladenie na teplotu M_f . Tento typ kalenia je vhodný pre tvarovo zložité a tenkostenné súčiastky [27, 30].

Kalenie so zmrazovaním – po ohreve a výdrži na kaliacej teplote nasleduje ochladenie na teplotu M_f a následné ochladenie pod teplotu M_f . Hodnoty teplôt sú v rozmedzí -60 až -70 °C. Výsledkom tohto typu kalenia je zníženie obsahu zvyškového austenitu v štruktúre a stálosť rozmerov. Používa sa pre ocele s vysokým obsahom uhlíka a pre legované ocele [27, 30].



Obr. 12 Martenzitické kalenie v ARA diagrame [28]

- 2) **Bainitické kalenie** – rovnako ako pri martenzitickom kalení, tak aj pri bainitickom kalení sa súčiastka ohreje na kaliacu teplotu s výdržou. Rozdiel je v rýchlosti ochladzovania, ktorá je nižšia ako pri martenzitickom kalení. V ARA diagrame krivka rýchlosti ochladzovania pretína krivku Bs. Medzi druhy bainitického kalenia patrí: nepretržité, izotermické, izotermické zušľachtovanie [27, 30].

Nepretržité bainitické kalenie – nevyužíva sa často, pretože tento typ kalenia je použiteľný iba pre ocele s oblasťou tvorby bainitu posunutou smerom vľavo v ARA diagrame [27, 30].

Izotermické bainitické kalenie – princíp je v ochladení súčiastky pod teplotu M_s z kaliacej teploty. Štruktúra je tvorená martenzitom, bainitom a zvyškovým austenitom. Podobné výsledky je možné dosiahnuť aj pomocou nepretržitého martenzitického kalenia [27, 30].

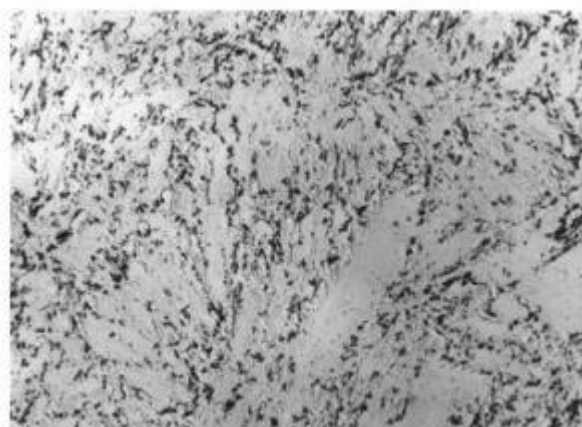
Izotermické bainitické zušľachtovanie – podobnosť s termálnym martenzitickým kalením. Ochladenie z kaliacej teploty na teplotu vyššiu ako je teplota M_s ($350 - 400$ °C), výdrž na tejto teplote až do konca bainitickej premeny a následné ochladenie na vzduchu. Výhodou tohto typu tepelného spracovania je, že nie je požadované následné popúšťanie súčiastky [27, 30].

Popúšťanie

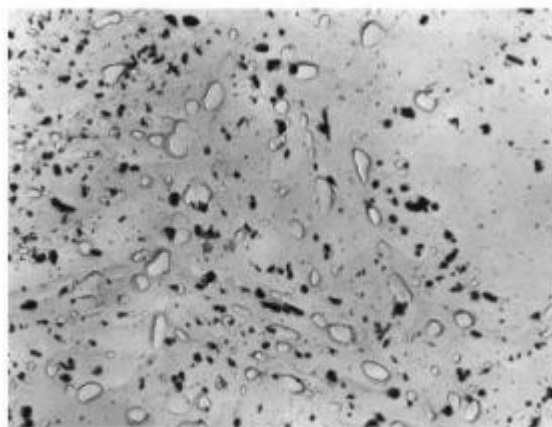
Popúšťanie je typ tepelného spracovania, ktoré je väčšinou realizované po kalení. Po kalení má materiál vysokú tvrdosť, ale je krehký a vnútorné napätie dosahuje vysokých hodnôt. Popúšťaním sa tieto vlastnosti zmierňujú a materiál je húževnatejší. Popúšťanie sa realizuje ohrevom pod teplotu A_{c1} , výdrží na tejto teplote (väčšinou 2 hodiny) a následným pomalým ochladením v peci alebo na vzduchu na teplotu okolia [27, 30].

Popúšťanie za nízkych teplôt (100 – 300 °C) znižuje vnútorné pnutie, zvyšuje húževnatosť a rozmerovú stálosť. Dochádza k rozpadu zvyškového austenitu na bainit a tiež k premene tetragonálneho martenzitu na kubický martenzit [27, 30].

Popúšťanie za vysokých teplôt (400 – 650 °C) dosahuje vyhovujúcu kombináciu pevnostných vlastností materiálu, plasticity a húževnatosti. Pri vyšších popúšťacích teplotách dochádza k rozpadu martenzitu na ferit a cementit. Feriticko-cementitická štruktúra sa nazýva sorbitická [27, 30].



Jemný sorbit

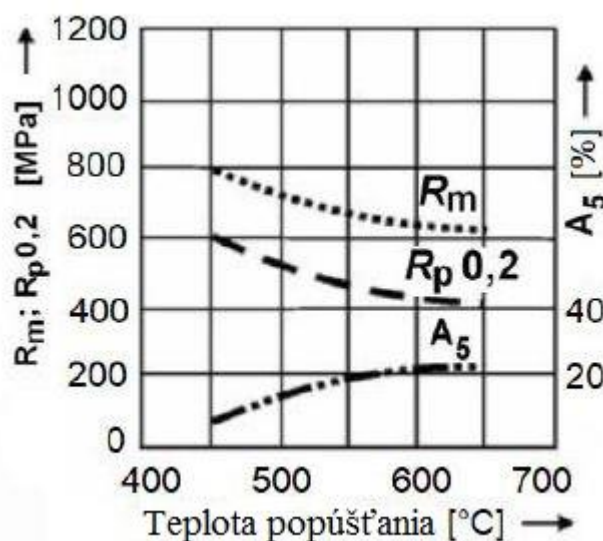


Hrubý sorbit

Obr. 13 Sorbitická štruktúra po zušľachtovaní [28]

Zušľachtovanie

Zušľachtovanie je proces tepelného spracovania, ktorý je kombináciou kalenia a popúšťania za vysokých teplôt. Výsledkom zušľachtovania je sorbitická štruktúra materiálu, ktorá je špecifická veľkou húževnatosťou, ťažnosťou a plasticitou pri zachovaní výborných pevnostných vlastností materiálu. Pre správne prevedenie zušľachtovania je potrebné, aby materiál mal pevné hranice chemického zloženia po celom priereze [27, 30].



Obr. 14 Závislosť mechanických vlastností materiálu na teplote popúšťania [28]

2.1.2 Antikorové ocele

Antikorové ocele patria do skupiny vysoko legovaných ocelí. Hlavným legujúcim prvkom je chróm, ktorého minimálny obsah je 11,5 %. Chróm je taktiež nositeľom vlastností, ktoré chránia materiál pred chemickou a elektro-chemickou koróziou. Ďalšími významnými legujúcimi prvkami je nikel, mangán, molybdén. Chróm je najvýznamnejším feritotvorným prvkom, nikel je najvýznamnejším austenitotvorným prvkom. Významným z hľadiska vlastností danej ocele je aj obsah uhlíka. Antikorové ocele sa z hľadiska štruktúry delia na: martenzitické, feritické, austenitické a duplexné [29, 31, 32].

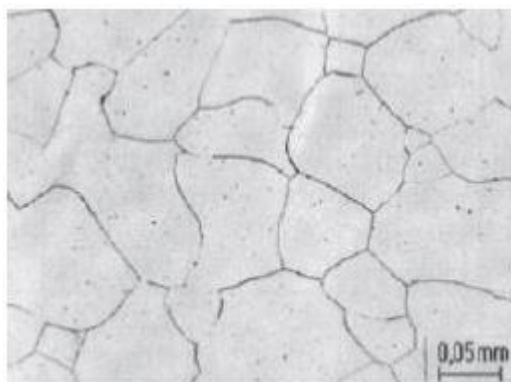
Feritické antikorové ocele

Tento typ antikorovej ocele je charakteristický nízkym obsahom uhlíka (max. 0,2 %, prípadne do 0,1 %) a vysokým obsahom chrómu (13 - 30 %). Feritické antikorové ocele sa z hľadiska obsahu chrómu delia do štyroch skupín [29, 31, 32]:

- Feritické ocele s obsahom chrómu medzi 11,5 až 13,5 % a obsahom uhlíka do 0,08 % - legovaním tejto ocele prvkami ako je titán, hliník alebo niób sa potlačí vznik martenzitickej štruktúry. Ocele tohto typu majú dobrú odolnosť proti korózii v atmosfére, vo vode bez prímiesí a vodnej pare. Využitie týchto ocelí je najmä v chemickom priemysle (výroba potrubí pre čerpadlá, výmenníky).
- Feritické ocele s obsahom chrómu medzi 16 až 18 % a obsahom uhlíka do 0,08 % - legujúcimi prvkami sú najčastejšie molybdén a titán. Pri vyššom obsahu uhlíka a tepelným spracovaním nad 900 °C dochádza k vzniku malého množstva austenitu v štruktúre. Takéto ocele sa nazývajú aj poloferitické. Ocele tohto typu odolávajú korózii popri atmosfére a vode aj v morskej vode, zriedených organických kyselinách, roztokoch soli, priemyslových vodách a atmosfére. Za tepla majú antikorózne vlastnosti

v alkalickom prostredí (benzín, pracie prostriedky). Využívané sú najmä v automobilovom a potravinárskom priemysle.

- c) Feritické ocele s obsahom chrómu medzi 20 až 30 % a obsahom uhlíka od 0,002 až 0,2 % - vysoký obsah chrómu u týchto ocelí zabezpečuje vysokú odolnosť proti korózii. S obsahom uhlíka medzi 0,1 až 0,2 % majú tiež vysokú žiaruvzdornosť, čím sa ich použitie rozširuje na výrobu tepelných výmenníkov a potrubia. Nevýhodou týchto ocelí je krehnutie pri ohreve nad 900 °C práve z dôvodu vysokého obsahu chrómu.
- d) Feritické ocele s obsahom chrómu medzi 25 až 30 % (superferity) – tento typ ocele má veľmi nízky obsah uhlíka do 0,025 %. Legujúcimi prvkami sú dusík, titán a niób. Tieto ocele majú dobrú odolnosť voči medzikryštalickej korózii (MKK), bodovej a štrbinovej korózii a voči koróznemu praskaniu pri namáhaní. Ďalšími výhodami sú dobrá zvariteľnosť, tvárnosť a taktiež lepšie mechanické vlastnosti. Použitie je v prostrediach, kde pôsobia na materiál oxidačné a organické kyseliny, vody s vysokým obsahom chloridov. Používa sa ako náhrada niklových zliatin z ekonomických dôvodov.



Obr. 15 Feritická štruktúra materiálu [32]

Martenzitické antikorové ocele

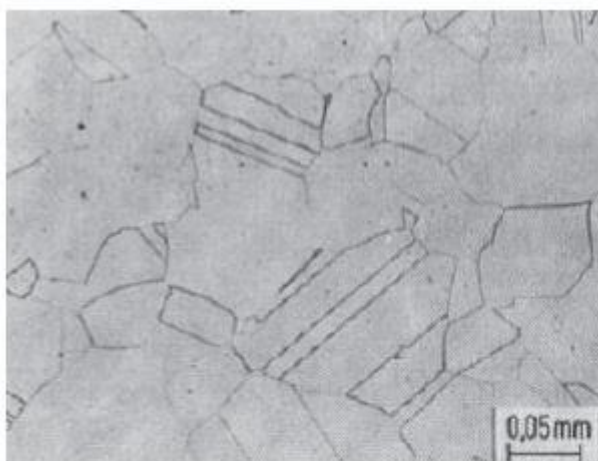
Martenzitické ocele vznikajú rýchlym ochladením (kalením) z teplôt nad 900 °C, kedy má materiál plne austenitickú štruktúru. Obsah uhlíka je v rozmedzí 0,2 až 1 % a obsah chrómu v rozmedzí 13 až 18 %. S vyšším obsahom uhlíka rastie aj tvrdosť materiálu. Martenzitické ocele, ktoré neobsahujú nikl, s obsahom uhlíka 0,1 až 0,4 % a obsahom chrómu 13 % sa používajú ako súčiastky do nízko agresívnych prostredí (voda, vodná para, atmosféra). Ocele s vyšším obsahom uhlíka (0,3 až 0,4 %) sa používajú na výrobu nožov a chirurgických nástrojov (nástroje, pri ktorých je potrebná abrazívna odolnosť materiálu, vysoká tvrdosť). V niektorých typoch martenzitických ocelí sa uhlík nahrádza niklom, no iba do takej miery, aby bola zachovaná schopnosť kalenia materiálu. Okrem chrómu ďalším legujúcim prvkom býva najčastejšie molybdén, ktorý zvyšuje antikorózne vlastnosti materiálu [29, 31, 32].



Obr. 16 Martenzitická štruktúra materiálu [32]

Austenitické antikorové ocele

Austenitické ocele majú spomedzi antikorových ocelí najlepšie vlastnosti (vyššia korózna odolnosť, žiaruvzdornosť, pevnosť pri tečení, odolnosť proti MKK, odolnosť proti koróznemu praskaniu, odolnosť proti praskaniu zvarov). Tieto vlastnosti sú dosiahnuté vo veľkej miere pridaním vyššieho obsahu legúr mimo chrómu. Najvýznamnejším legujúcim prvkom, ktorý je zároveň aj austenitotvorným prvkom, je nikel. Jeho množstvo závisí od použitia danej súčiastky. Nikel je do určitej miery zameniteľný za mangán v kombinácii s malým množstvom dusíka. Pre zachovanie vysokých mechanických vlastností sa vyžaduje jemnozrnná štruktúra materiálu. Tá sa dosiahne vhodným tepelným spracovaním, ktorým býva rozpúšťacie žihanie pri teplotách 1000 – 1150 °C a následným ochladením na vzduchu, prípadne vo vode. Austenitické antikorové ocele sa ďalej delia na viacero druhov podľa typu hlavných legujúcich prvkov (chróm-niklové, chróm-mangánové, chróm-nikel-molybdénové) [29, 31, 32].



Obr. 17 Austenitická štruktúra materiálu [32]

2.1.3 Titánové zliatiny

Titán je prvok SI sústavy, ktorý sa bežne v prírode nevyskytuje v čistom zložení. V priemysle sa vo väčšej miere využívajú zliatiny titánu pre ich lepšie vlastnosti v porovnaní s čistým titánom. Zliatiny titánu sa delia do 3 skupín podľa obsahujúcich stabilizátorov [29, 33, 34]:

- a) α zliatiny – stabilizačnými prvkami sú Al, O, N, C. Najvýznamnejším stabilizačným prvkom je hliník. Majú nízku až strednú pevnosť v ťahu a vysokú pevnosť pri tečení, dobrú ťažnosť a húževnatosť, sú dobre zvariteľné, odolné proti oxidácii, nehorľavé a zachovávajú si vlastnosti aj pri nízkych teplotách.
- b) β zliatiny – stabilizačnými prvkami sú Mo, V, Ta, Nb, Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, Si, H. Medzi výhody týchto zliatin patria antikoročné vlastnosti, všeobecná zvariteľnosť, vysoká pevnosť až do medzných teplôt, dobrá tepelná spracovateľnosť.
- c) α - β – zliatiny – predstavujú kombináciu vlastností α a β zliatin titánu. Ich nevýhodou je znížená pevnosť pri tečení oproti α zliatinám, taktiež strata ťažnosti v mieste zvaru a pomerne náročný proces tvárnenia za studena.

Titánové zliatiny sa používajú vo veľmi širokom spektre priemyslu. Najväčšie množstvo titánových zliatin sa používa v leteckom priemysle (výroba krídel, plášte palivových nádrží, kryty motorov, lopatky turbín a spojovacie časti). Ďalším významným odvetvím, kde sa používajú zliatiny titánu je medicína (výroba implantátov, kĺbových náhrad, chirurgických nástrojov). Zliatiny titánu sa používajú aj v chemickom priemysle (cisterny, výmenníky, chladiče chlóru, dechloračné veže), automobilovom priemysle (výfuky, sacie a motorové ventily, spojovacie tyče), športovom priemysle (lyže, golfové palice, bejzbalové pálky) a tiež vo vesmírom, armádnom a námornom priemysle [29, 33, 34].



Obr. 18 Použitie zliatin titánu v leteckom priemysle [35]



Obr. 19 Titánová kĺbová náhrada [36]

Titán sa všeobecne zaraďuje medzi ťažko obrobiteľné materiály. Hlavnou príčinou je chemická reaktivita titánu. Následkom tejto reaktivity je „lepenie“ materiálu obrobku na nástroj a následné odlomenie sprevádzané vytrhnutím časti nástroja, čím dochádza k jeho poškodeniu. Ďalšia vlastnosť, ktorá komplikuje obrobiteľnosť titánu je jeho nízka tepelná vodivosť. Nízka tepelná vodivosť má za následok vznik tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy v oblasti prebiehajúceho rezného procesu a tiež veľké tepelné zaťaženie nástroja. S rastúcou teplotou pri obrábacom procese titánu súvisí aj zvyšovanie mechanických vlastností titánu, čím sa stáva proces obrábania náročnejší [29, 33, 34].

Pri brúsení titánových zliatin môže dochádzať k chemickej reakcii medzi brúsiacim kotúčom (BK) a obrobkom. Táto reakcia vedie k poškodeniu BK a má za následok zníženie životnosti BK a zníženie kvality povrchu obrobku po brúsení. Čiastočná eliminácia nežiaducich javov pri brúsení titánových zliatin sa dá dosiahnuť viacerými spôsobmi [29, 33, 34]:

- ◁ Voľba BK – dôležitý je výber typu abrazíva a spojiva. V súčasnosti je možné používať BK so špeciálne tvarovaným abrazívnym zrnom, ktoré znižujú množstvo vzniknutého tepla. Taktiež je vhodné používať spekané abrazívne zrná s tzv. samoostrením.
- ◁ Nastavenie rezných parametrov – najdôležitejším parametrom je rezná rýchlosť, ktorej veľkosť je v porovnaní s bežnými ocelami polovičná až tretinová. Ďalším parametrom, ktorý vplyva na kvalitu povrchu obrobku je interval a rýchlosť zrovnávania BK. Interval zrovnávania BK je tak isto nižší ako u ocelí z dôvodu vznikajúcej chemickej reakcie medzi BK a obrobkom a vyššieho tepelného zaťaženia BK.
- ◁ Voľba procesnej kvapaliny (PK) – voľba PK je v najväčšej miere ovplyvnená typom BK, ale aj typom obrábanej titánovej zliatiny. Najdôležitejším faktorom voľby PK je predchádzanie vzniku chemickej reakcie s BK a taktiež

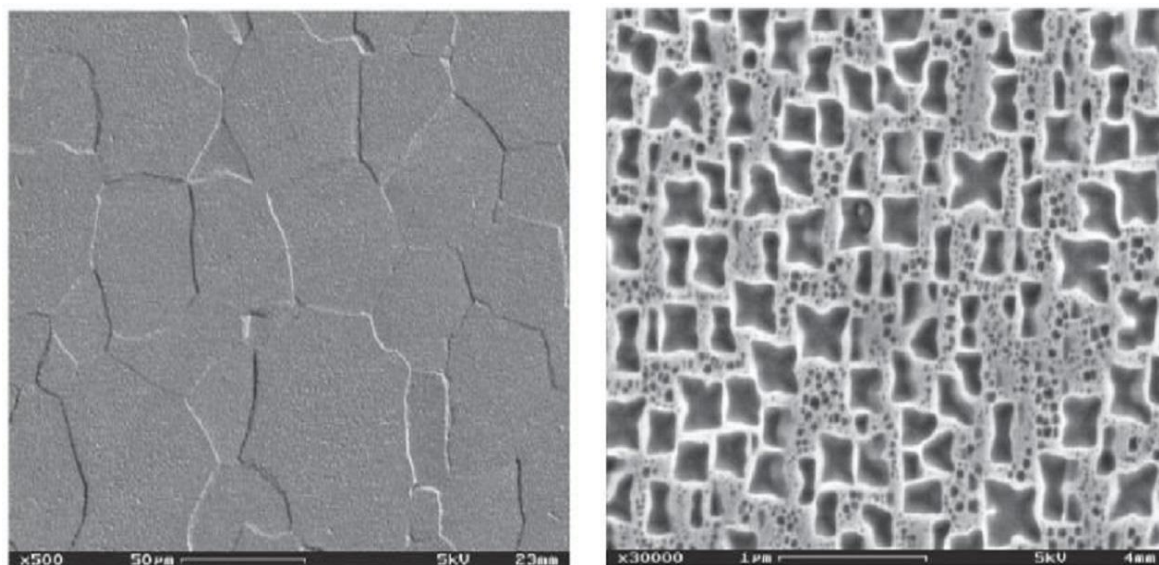
s povrchom obrobku. Dôležitou súčasťou použitia PK pri obrábaní titánových zliatin je aj neustála filtrácia PK a jej pravidelná výmena.

2.1.4 Superzliatiny

Do skupiny superzliatin, označovaných aj ako HRSA (Heat-resistant superalloys), patria materiály, ktoré sú charakteristické žiaruvzdornosťou a žiarupevnosťou. Vysoké hodnoty mechanických vlastností, odolnosti proti korózii a pevnosti pri tečení si tieto materiály dokážu udržať aj pri pracovnej teplote dosahujúcej hodnotu 70 % teploty tavenia danej zliatiny. Vďaka týmto vlastnostiam sú tieto materiály využívané pri výrobe ťažko namáhaných súčiastok v náročných pracovných prostrediach, napr.: kozmický a letecký priemysel (motory), lodný, ťažobný a energetický priemysel, prípadne medicínsky priemysel [29, 33, 37, 38].

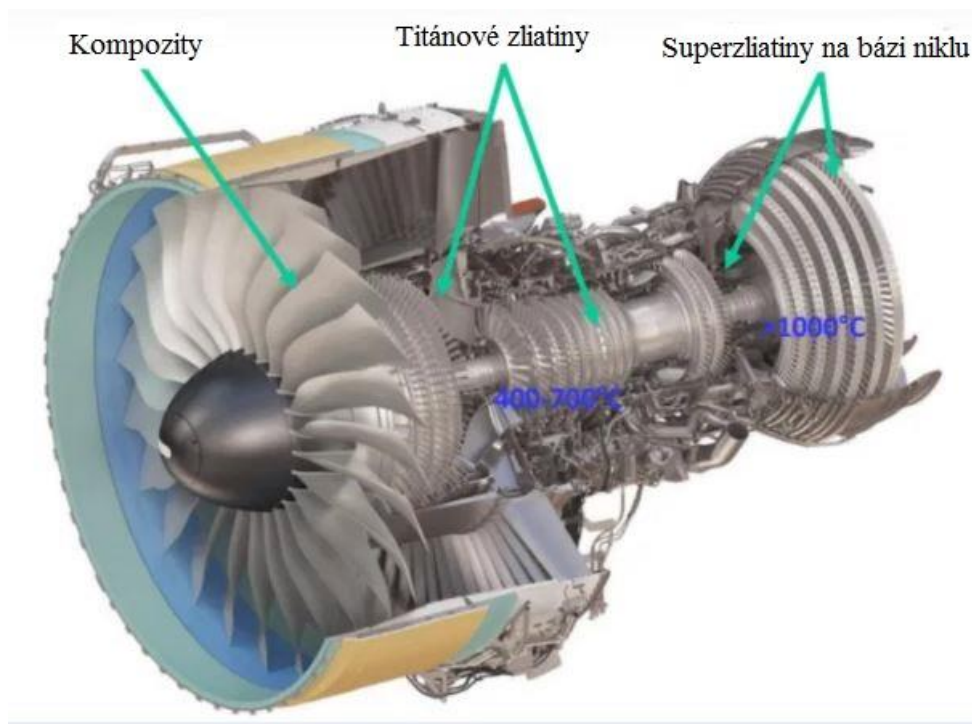
Superzliatiny sa delia podľa obsahu prvku, ktorý je najviac obsiahnutý v materiáli do 3 skupín [29, 33, 37, 38]:

- ◁ Zliatiny na báze niklu – zliatiny niklu tvoria väčšinu produkcie superzliatin. Väčšinou sa objavujú pod obchodným názvom Inconel. Zliatiny niklu sa ďalej delia na konštrukčné, žiaruvzdorné a žiarupevné, niklové zliatiny so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami. Ich využitie je najmä vo výrobe leteckých motorov.



Obr. 20 Štruktúra niklových zliatin [39]

- ◁ Zliatiny na báze železa – tieto zliatiny vznikli z austenitických antikorových ocelí, preto aj ich obrobitelnosť je podobná týmto materiálom. Výhodou zliatin železa je nízka tepelná rozťažnosť, preto sa používa pre výrobu hriadeľov a rôznych puzdier.
- ◁ Zliatiny na báze kobaltu – zliatiny kobaltu disponujú lepšími žiaruvzdornými a žiarupevnými vlastnosťami ako zliatiny niklu. Preto sú používané pre komponenty leteckých motorov, ktoré sú najviac tepelne namáhané. Taktiež sú využívané pri výrobe kĺbových implantátov, pretože ich odolnosť voči korózii je vyššia ako u niklových zliatin.



Obr. 21 Použitie niklových zliatin v leteckom priemysle [40]

Obrábací proces superzliatin je náročný pre ich mechanické a fyzikálne vlastnosti. Štruktúra týchto materiálov zahŕňa austenitickú maticu, ktorá je príčinou rastu tvrdosti pri obrábaní. Na obrobenej ploche, ktorá je tlakovo namáhaná vzniká deformovaná vrstva obsahujúca vysoké zvyškové napätie, ktoré zhoršuje obrobitelnosť materiálu. Vznik tejto vrstvy je možné eliminovať tvárnením za studena, valcovaním polotovaru za tepla, prípadne žiňaním. Superzliatiny sú tiež charakteristické nízkou tepelnou vodivosťou, čím dochádza k veľkému namáhaniu nástroja a znížením jeho životnosti, keďže sa teplo začne kumulovať v nástroji, a nie je v takej miere odvádzané z miesta rezu v trieske. Preto je dôležité použitie vhodnej PK so smerovaním priamo do miesta rezu. V prípade brúsenia je vhodnejšie smerovanie PK na obvod BK tesne pred miesto delenia materiálu. Pri dokončovacích technológiách sa dosahuje lepšia kvalita povrchu pri dokončovaní materiálov so schopnosťou vytvrdzovacieho starnutia [29, 33, 37, 38].

2.2 Príčiny zhoršenej obrobitelnosti

Obrobitelnosť je vlastnosť materiálu, ktorú je možné definovať ako mieru schopnosti byť formovaná danou trieskovou alebo beztrieskovou metódou obrábania. Pre všetky materiály sú dané triedy obrobitelnosti, z ktorých sa vychádza pri stanovení rezných parametrov obrábacieho procesu. Obrobitelnosť materiálu sa posudzuje obrábaním skúmaného materiálu a etalónového materiálu pri daných (rovnakých) rezných parametroch. Zhoršená obrobitelnosť môže byť spôsobená viacerými faktormi, ktoré vplyvajú na proces obrábania. Medzi najvýznamnejšie faktory patrí: typ materiálu (mechanické, fyzikálne a chemické vlastnosti materiálu obrobku a nástroja, štruktúra materiálu), spôsob výroby obrábaného materiálu (polotovaru), použité tepelné spracovanie materiálu obrobku, rezné parametre (rezná rýchlosť, šírka záberu hlavného ostria nástroja, posuvová rýchlosť), pracovné prostredie (procesné kvapaliny, plyny, pasty), typ technológie výroby danej súčiastky (sústruženie, frézovanie, vŕtanie, brúsenie), geometria nástroja (tvar, typ abrazíva a spojiva) [26, 29].

3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

3.1 Schaeffler, spol. s r.o.

Spoločnosť Schaeffler založili bratia Georg a Wilhelm Schaefflerovci v roku 1946 v Nemecku. V súčasnej dobe má spoločnosť Schaeffler výrobné závody a pobočky po celom svete s počtom zamestnancov viac ako 90 000. Spoločnosť Schaeffler združuje viacero dcérskych spoločností ako napr.: INA, LuK, FAG. Hlavným výrobným sortimentom sú rôzne typy ložísk, komponenty pre automotive a industry odvetvie. Výrobnou stratégiou spoločnosti je mobilita zajtrajška, ktorá zahŕňa ekologickejšiu a bezpečnejšiu dopravu. V rámci tejto stratégie sú vyčlenené 4 hlavné odvetvia: ekologické pohony (priemyselné pohony, elektromobily), mestská mobilita (dvojkoľosové vozidlá, vnútramestské železnice), medzimestská mobilita (koľajnicové vozidlá, lietadlá), energetická sféra (výroba energie z obnoviteľných zdrojov, zdokonaľovanie konvenčnej výroby el. energie). V Slovenskej republike fungujú dva výrobné závody spoločnosti Schaeffler. Jeden sa nachádza v Kysuckom Novom Meste a druhý v Skalici (tu je realizovaná experimentálna časť). Závod v Skalici bol spustený do prevádzky v roku 1991 a v súčasnosti zamestnáva približne 5000 ľudí. Výroba je zameraná na produkciu valčekových a ihlových ložísk (axiálne a radiálne), komponenty ložísk, rôzne lisované komponenty a komponenty pre automobilový priemysel (synchronne krúžky, komponenty spojok).

3.2 Návrh experimentálnej časti

Experimentálna časť bola realizovaná v spoločnosti Schaeffler a zameraná na brúsenie TOM. Vyhodnocované bolo technologicko-ekonomické hľadisko výroby skúmaných obrobkov. Hlavnou myšlienkou experimentálnej časti bolo porovnanie viacerých typov BK pri brúsení daného obrobku na danom brúsiacom stroji. Skúmaných bolo viacero parametrov, ktoré boli následne porovnané a vyhodnotené.

3.3 Použitý stroj pre experimentálnu časť

Pre realizáciu experimentálnej časti boli použité 2 brúsiace stroje v závislosti od druhu obrobku. Pre brúsenie ložiskových krúžkov bola použitá otvorová brúska Novamatic 2G od spoločnosti Meccanica Nova. Pre brúsenie piestov bola použitá bezhrotová brúska Jupiter od spoločnosti Junker.

3.3.1 Otvorová brúska Novamatic 2G

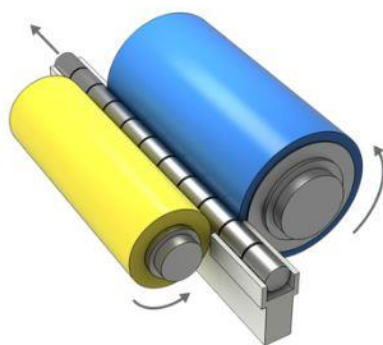
Otvorová brúska Novamatic 2G od spoločnosti Meccanica Nova je vyrábaná vo viacerých prevedeniach v závislosti od veľkosti pracovného priestoru a priemeru obrobku. Brúska je vybavená viacerými modernými technológiami, ktoré znižujú strojný čas pre dané obrobky. Zrovnávanie BK je väčšinou realizované pomocou diamantového zrovnávača s jedným hrotom. Výhodou je možnosť inštalácie troch takýchto zrovnávačov, čím sa znižuje zrovnávací časový interval [41].



Obr. 22 Otvorová brúska Novamatic 2G [41]

3.3.2 Bezhrotová brúska Jupiter

Bezhrotová brúska Jupiter od spoločnosti Junker je vyrábaná vo viacerých prevedeniach v závislosti od veľkosti obrábaného dielu. Brúska Jupiter je vybavená dvomi kotúčmi, kde jeden je brúsiaci a druhý podávací (prítlačný). Obrobok je umiestnený do medzery medzi BK, podávací kotúč a vodiacu lištu (obrobok nie je upínaný). Tlak, ktorý vzniká pri brúsiacom procese pritláča obrobok k podávaciemu kotúču, ktorý znižuje obvodovú rýchlosť obrobku na hodnotu obvodovej rýchlosti podávacieho kotúča. Podmienkou správneho „upnutia“ je väčšia trecia sila medzi obrobkom a podávacím kotúčom ako je medzi BK a obrobkom. Výhodou je možnosť nastavenia otáčok a sklonu podávacieho kotúča. Tento typ brúsenia sa nazýva priebežné brúsenie [42].



Obr. 23 Priebežné brúsenie [42]

Brúska Jupiter ponúka tiež možnosť realizácie zapichovacieho brúsenia. Pri tomto type brúsenia je možné obrobiť na jedno upnutie tvarovo zložitejšie diely (profilované priemery dielu). Ďalšou výhodou tohto typu brúsenia je aj možnosť vyosenia podávacieho kotúča do uhla 15° . Vďaka tomu je možné brúsiť nakrúžky a čela obrobku. Nevýhodou je potreba špeciálne tvarovaného BK [42].



Obr. 24 Zapichovacie brúsenie [42]

3.4 Použitý BK pre experimentálnu časť

3.4.1 BK Schmeier

Prvým nástrojom použitým pri realizácii experimentálnej časti bol BK od spoločnosti Schmeier. Tento BK je tvorený korundom (Al_2O_3) vo forme abrazívnych zŕn so zrnitosťou A12 a keramickým spojivom.



Obr. 25 BK Schmeier

3.4.2 BK 3M

Ďalším BK použitým pri realizácii experimentálnej časti bol BK od spoločnosti 3M. Abrazívne zrná sú tvorené CBN materiálom so zrnitosťou B91. Spojivo je keramické.



Obr. 26 BK 3M

3.4.3 BK Hermes

Jedným z použitých BK pri realizácii experimentálnej časti bol BK od spoločnosti Hermes s označením HK 80 K6 V09G 63M/S. Abrazívne zrná sú tvorené korundom (Al_2O_3), spojivo je keramické. Ide o BK s vyššou pórovitosťou.

3.4.4 BK Saint Gobain (SG)

Tento typ BK bol použitý pre brúsenie obrobku 3. Označenie BK je 21A 220 JOT 820. BK disponuje abrazívnym zrnom vo forme korundu (Al_2O_3), spojivo je bakelitové (živicové), stredná tvrdosť BK a jemná zrnitosť.

3.4.5 BK Tyrolit

Posledným použitým BK pri realizácii experimentálnej časti bol BK od spoločnosti Tyrolit s označením C 1502 N6A V18 63. Abrazívne zrná sú vo forme karbidu kremíka, spojivo je keramické, BK má strednú tvrdosť.

3.5 Použité obrobky pre experimentálnu časť

V experimentálnej časti boli skúmané tri obrobky rozdielnych materiálov a tvarov. Všetky skúmané obrobky sú už v spoločnosti Schaeffler zaradené do sériovej výroby.

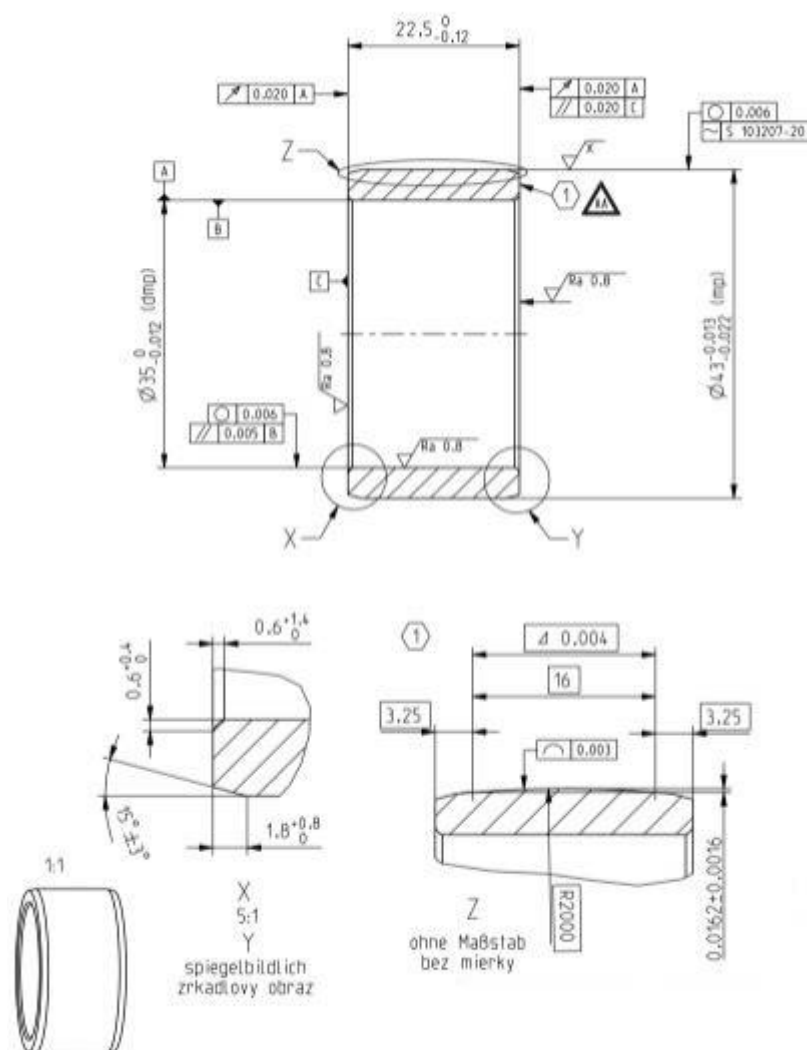
3.5.1 Obrobok 1

Prvým skúmaným obrobkom bol vnútorný ložiskový krúžok z ložiskovej ocele 100CrMnSi6-4 (14 209 - ČSN). Táto oceľ je vhodná pre kalenie a taktiež pre tvárnenie za tepla (teploty 800 – 1050 °C). Kalenie je realizované do vody (780 – 810 °C) alebo do oleja (810 – 830 °C). Po kalení má materiál perlitickú štruktúru (globulárny perlit) s podielom lamelárneho perlitu do 10 %. Popúšťanie je realizované v závislosti od potrebných mechanických vlastností obrobku. Doba kalenia sa volí medzi 2 až 6 hodín, teplotný interval je od 150 °C do 250 °C. Trieda obrobiteľnosti je 12b. Mechanické a fyzikálne vlastnosti, chemické zloženie tohto materiálu sú uvedené v tabuľke 3.5.1a.

Skúmaný obrobok bol v stave po karbonitridizácii, kalení a popúšťaní. Hĺbka karbonitridovanej vrstvy bola 0,3 mm s tvrdosťou povrchu 61 HRC.

Tab. 3.5.1 Mechanické, fyzikálne vlastnosti, chemické zloženie ocele 100CrMnSi6-4

Chemické zloženie [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	Fe
0,90-1,10	0,90-1,20	0,35-0,65	1,30-1,65	max. 0,30	max. 0,25	max. 0,027	max. 0,03	zvyšok
Mechanické a fyzikálne vlastnosti								
Medza pevnosti [MPa]	Medza klzu [MPa]	Ťažnosť [%]	Tvrdosť [HB]	Kontrakcia [%]	Hustota [kg.m ⁻³]	Merná tepelná kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Rezistivita [Ω.m]	
608-765	441	18	210-225	35	7850	-	-	



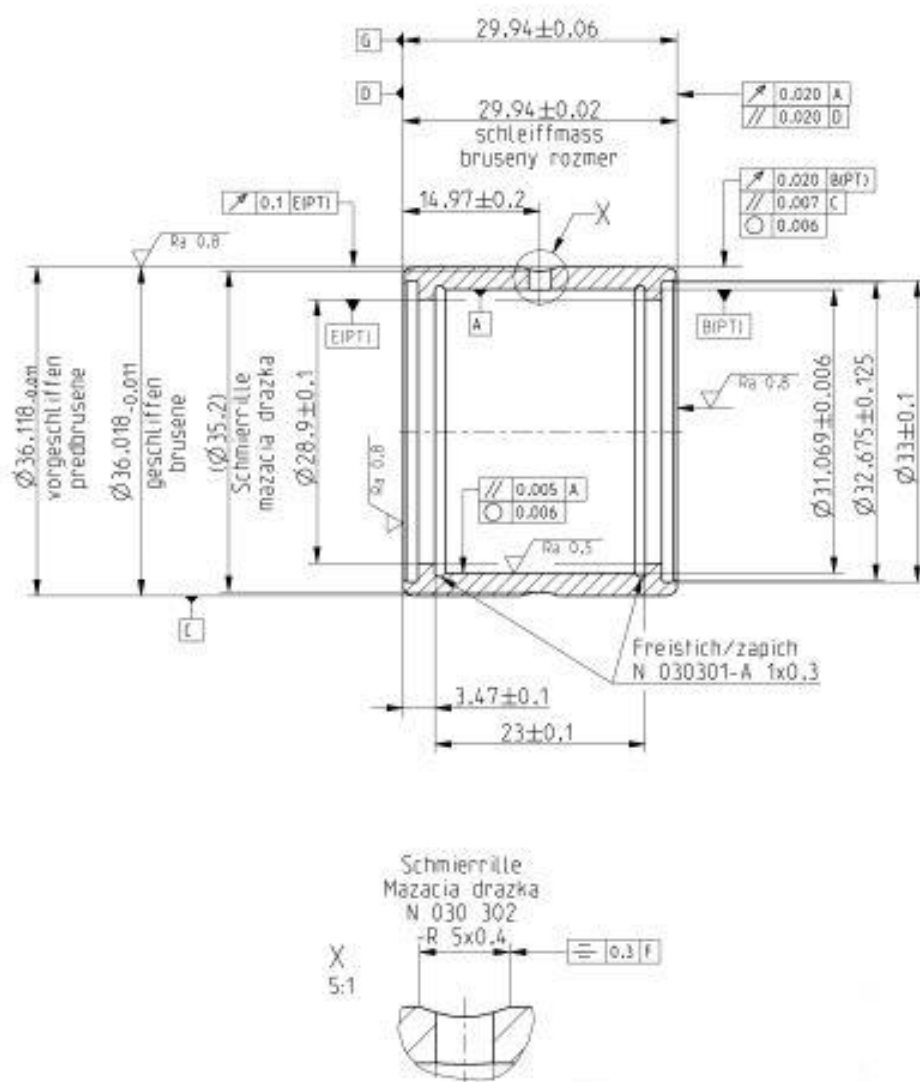
Obr. 27 Náčrt obrobku č. 1

3.5.2 Obrobok 2

Ďalším skúmaným obrobkom bol vonkajší ložiskový krúžok z antikorovej ocele X90CrMoV18 (17 151 – ČSN). Oceľ je vhodná pre kalenie, tvárnenie za tepla sa realizuje v teplotnom intervale 850 – 1050 °C. Kalenie prebieha z pásma teplôt 980 – 1020 °C (po kalení sa dosahuje medza pevnosti až do 2000 MPa). Popúšťanie je realizované v teplotnom intervale 150 – 200 °C. Tento materiál sa používa pre výrobu nožov, chirurgických nástrojov, sedlá ventilov a pre výrobu foriem, kde dochádza ku kontaktu s chemicky agresívnymi hmotami.

Tab. 3.5.3 Mechanické, fyzikálne vlastnosti, chemické zloženie ocele X90CrMoV18

Chemické zloženie [hm. %]								
C	Cr	Mo	V	Mn	Si	S	P	Fe
0,85-0,95	17-19	0,9-1,3	0,07-0,12	max. 1,0	max. 1,0	max. 0,03	max. 0,04	zvyšok
Mechanické a fyzikálne vlastnosti								
Medza pevnosti [MPa]	Medza klzu [MPa]	Ťažnosť [%]	Tvrdosť [HB]	Kontrakcia [%]	Hustota [kg.m ⁻³]	Merná tepelná kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Rezistivita [Ω.m]	
800	550	20	max. 265	-	7700	-	-	

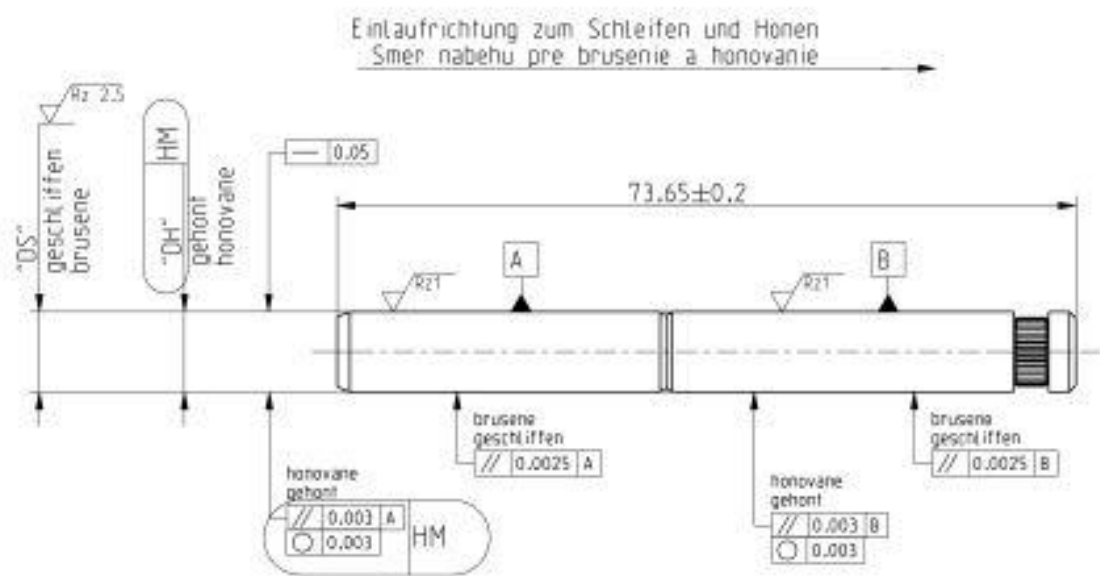


Obr. 28 Náčrt obrobku č. 2

3.5.3 Obrobok 3

Posledným skúmaným obrobkom bol piest z antikorovej ocele X90CrMoV18. Chemické zloženie, mechanické a fyzikálne vlastnosti, tepelné spracovanie pozri Kapitola 3.5.3.

Obrobok 3 bol v stave po kalení a popúšťaní. Popúšťanie bolo realizované pri teplote 200 °C. Tvrdosť povrchu bola 55 (+6) HRC.



Obr. 29 Náčrt obrobku č. 3

4 REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

4.1 Pribeh experimentálnej časti

Hodnoty parametrov nastavenia stroja boli zhodné s reálnymi výrobnými hodnotami. Namerané hodnoty boli získané z výrobnéj dávky danej výrobnéj smeny.

4.2 Brúsenie obrobku 1

Brúsenie obrobku 1 prebiehalo na otvorovej brúske Novamatic 2G s použitou procesnou kvapalinou vo forme oleja. Porovnávanými BK boli Schmeier (Al_2O_3) a 3M (CBN). Pre zrovnávanie BK Schmeier bol použitý jednohrotý diamantový zrovnávač. Pre zrovnávanie BK 3M bola použitá zrovnávací korunka. Hodnoty rezných parametrov sú uvedené v tabuľke 4.1a. Nastavenie reznej rýchlosti bolo dané výrobcom BK. Otáčky pracovného vretena boli vypočítané zo vzťahu pre reznú rýchlosť:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

Posuvová rýchlosť bola nastavená z hľadiska technologickej operácie (hrubovanie/stredné hrubovanie/jemné hrubovanie/dokončovanie). Hodnota intervalu zrovnávania BK bola veľmi významná z hľadiska produktivity, keďže zrovnávanie BK po každom obrobenom kuse výrazne zvyšovalo výrobný čas. Úber materiálu pri zrovnávaní BK 3M bol približne trojnásobne nižší ako u BK Schmeier, čím životnosť BK 3M dosahovala výrazne vyššiu hodnotu v porovnaní s BK Schmeier. Tento rozdiel bol spôsobený odlišnými vlastnosťami abrazívnych zŕn daných BK (CBN má výrazne vyššiu samoostriacu schopnosť v porovnaní s korundom).

Tab. 4.2a Nastavené hodnoty rezných parametrov procesu brúsenia

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK 3M
Rezná rýchlosť v_c [$m \cdot s^{-1}$]	45	55
Otáčky n [s^{-1}]	510	625
Posuvová rýchlosť [$\mu m \cdot s^{-1}$]	4,8/3,6/1,8/0,9	4,8/3,6/1,8/0,9
Priemer BK D [mm]	28	28
Interval zrovnávania BK T_z [ks]	1	70
Úber materiálu pri zrovnávaní BK $d_{\text{úber}}$ [μm]	25	8
Veľkosť intervalu využiteľného priemeru BK d_{ok} [mm]	7	7

Po brúsení kusu nasledovalo zmeranie rozmerov. Najvýraznejším rozdielom medzi danými BK bola stabilita nameraných hodnôt. Pri BK 3M boli hodnoty parametrov s minimálnymi odchýlkami. Pri BK Schmeier však dochádzalo k markantným rozdielom v hodnotách (drsnosť povrchu, teplotná kompenzácia po brúsení). Meranie sa realizovalo ihneď po brúsení (za zvýšenej teploty) a po následnom vychladnutí. Rozdiel v zmeraných hodnotách vnútorného priemeru obrobku za zvýšenej teploty a vychladnutí je uvedený v tabuľke 4.2b, v bunke Teplotná kompenzácia po brúsení. Meradlá použité pri meraní daných rozmerov a tolerancií boli súčasťou pracoviska (pozri obrázok č. 30).



Obr. 30 Meradlo pre meranie vnútorného priemeru ložiskového krúžku

Životnosť BK bola odvodená a vypočítaná zo vzťahu 2. Uvedený vzťah vychádza z intervalu zrovnávania BK, úberu materiálu pri zrovnávaní BK a využiteľného priemeru BK. Stanovenie využiteľného priemeru BK sa realizuje pomocou pravidla, kde životnosť BK sa končí pri dosiahnutí 60 % hodnoty veľkosti obrábaného otvoru.

$$T = \frac{d_{ok}}{d_{úber}} \cdot T_z [ks] \quad (2)$$

Tab. 4.2b Namerané hodnoty technologických parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK 3M
Drsnosť povrchu Ra [μm]	0,15 – 0,35	0,25
Priamosť [μm]	max. 2	max. 2
Kruhovitosť [μm]	max. 3	max. 2
Teplotná kompenzácia po brúsení [μm]	3 – 8	4
Životnosť BK T [ks]	280	61 250

Ďalším krokom pri realizácii experimentálnej časti bolo spracovanie hodnôt produkčných parametrov, ktoré sa nachádzajú v tabuľke 4.1c. Skúmané boli reálne (namerané) hodnoty cyklových časov v porovnaní s teoretickými (plánovanými) hodnotami cyklových časov. Z tabuľky 4.2c je viditeľný značný rozdiel v nameraných cyklových časoch medzi jednotlivými BK. Tento rozdiel sa odzrkadľoval najmä v celkovej produkcii za daný časový úsek (v tomto prípade 8-hodinová smena).

Dôležitým faktorom z ekonomického hľadiska bola miera percentuálnej nepodarkovitosti. Nepodarky sa delia na dva druhy:

- ◁ Nepodarky s nutnosťou opravy – tento typ nepodarku je nutné opätovne zaradiť do procesu brúsenia, keďže je brúsený rozmer mimo tolerancie danej výkresovou dokumentáciou. Oprava je teda možná, no dochádza k zníženiu produkcie pre nutnosť opakovania procesu brúsenia.
- ◁ Nepodarky s neodstrániteľnou nepresnosťou – pri tomto type nepodarkov nie je možné vykonať opravu rozmeru. Ide o zhotovenie rozmeru mimo toleranciu, kde je oprava nerealizovateľná. Ide napríklad o ložiskový krúžok, ktorý má vnútorný priemer vyrobený väčší ako je predpísaný výkresovou dokumentáciou. Nepodarok je nutné umiestniť do odpadu, čím dochádza k finančným stratám.

Tab. 4.2c Namierané hodnoty produkčných parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK 3M
Cyklový čas (plán) [s]	24	24
Cyklový čas (skutočný) t_c [s]	31,27	16,485
Odchýlka cyklových časov [%]	23,25	-45,54
Počet vyrobených kusov A_1 [ks]	640	1278
Nepodarky B_1 [%]	24	2,2

Posledným porovnávacím faktorom boli ekonomické parametre výroby uvedené v tabuľke 4.1d. Obrovský rozdiel bol viditeľný v cene jednotlivých BK. Cena BK 3M bola viac než 150x vyššia ako cena BK Schmeier. Podstatný bol však rozdiel v cene brúsenia jedného kusu obrobku. Tento parameter bol vypočítaný podľa vzťahu 3.

$$N_{ks} = \frac{t_c}{60} \cdot N_s + \frac{N_{BK}}{T} [\text{€}] \quad (3)$$

$$N_n = B_1 \cdot A_1 \cdot N_v [\text{€}] \quad (4)$$

Tab. 4.2d Hodnoty ekonomických parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK 3M
Cena BK N_{BK} [€]	1,5	250
Cena výrobku N_v [€]	2	2
Sadzba prevádzky stroja N_s [€/min]	0,6	0,6
Cena brúsenia 1 ks obrobku N_{ks} [€]	0,32	0,17
Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov N_n [€]	308	58
Pomer ceny BK a životnosti BK [€/ks]	0,00536	0,0041

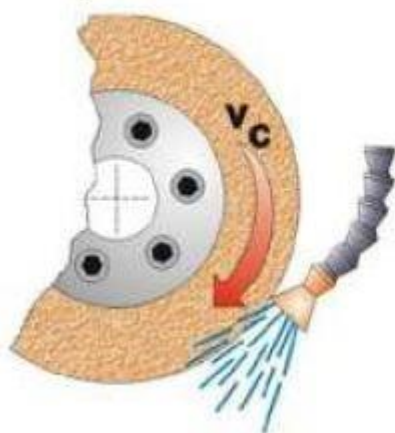
4.3 Brúsenie obrobku 2

Brúsenie obrobku č. 2 bolo uskutočnené na otvorovej brúske Novamatic 2G. Porovnávané BK boli od spoločnosti Schmeier a od spoločnosti Hermes. Procesná kvapalina bola použitá rovnaká ako pri obrobku č. 1, teda olej. Pre zrovnávanie oboch typov BK bol použitý jednhotý diamantový zrovnávač. Princíp a postup porovnávania bol rovnaký ako pri obrobku č. 1 v časti 4.2. Dané BK majú odlišnú štruktúru a vlastnosti, preto boli hodnoty nasledujúcich parametrov diametrálne odlišné. Skúmaná výrobná dávka bola stanovená na 3500 kusov.

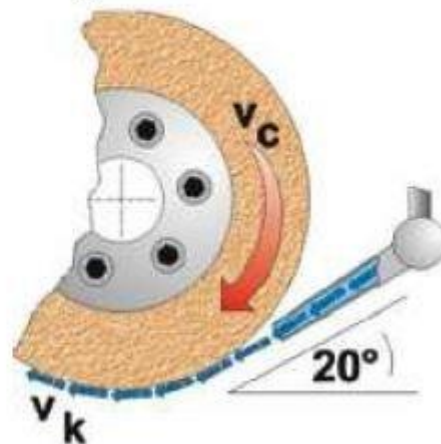
Pri brúsení BK od spoločnosti Schmeier dochádzalo k veľmi vysokému zanášaniu povrchu BK materiálom obrobku. Tento fakt bol príčinou nadmerne vysokého tepelného namáhania obrábanej súčiastky. „Zalepený“ BK strácal svoje abrazívne vlastnosti, čím dochádzalo k zvýšeniu trecích síl medzi nástrojom a obrobkom. Zvýšenie trecích síl viedlo k zvyšovaniu teploty v pracovnom prostredí. Oceľ vykazuje dobrú tepelnú vodivosť, čo zapríčiňovalo zvyšovanie teploty povrchu obrobku až na teplotu popúšťania. Nežiaducim popustením povrchu obrobku dochádzalo k zmene mechanických vlastností v danej hĺbke od povrchu obrobku. V štruktúre materiálu obrobku dochádzalo k vzniku zvyškových ťahových napätí, čím dochádzalo k vzniku mikrotrhlín. Tieto mikrotrhliny sa následne vplyvom ťahových napätí rozširujú a nepriaznivo vplyvajú na životnosť obrobku, prípadne na samotnú funkcionálnosť obrobku.

Príčin vzniku tepelne poškodennej povrchovej vrstvy obrobku bolo niekoľko a medzi najvýznamnejšie patria: nesprávna voľba BK (nízka pórovitosť), nevhodné rezné parametre (vysoká posuvová rýchlosť, vysoký záber BK na otáčku), nesprávne chladenie procesnou kvapalinou (nevhodné vlastnosti kvapaliny, nesprávna pozícia dýzy, nesprávna hodnota tlaku kvapaliny a rýchlosť dopadajúcej kvapaliny).

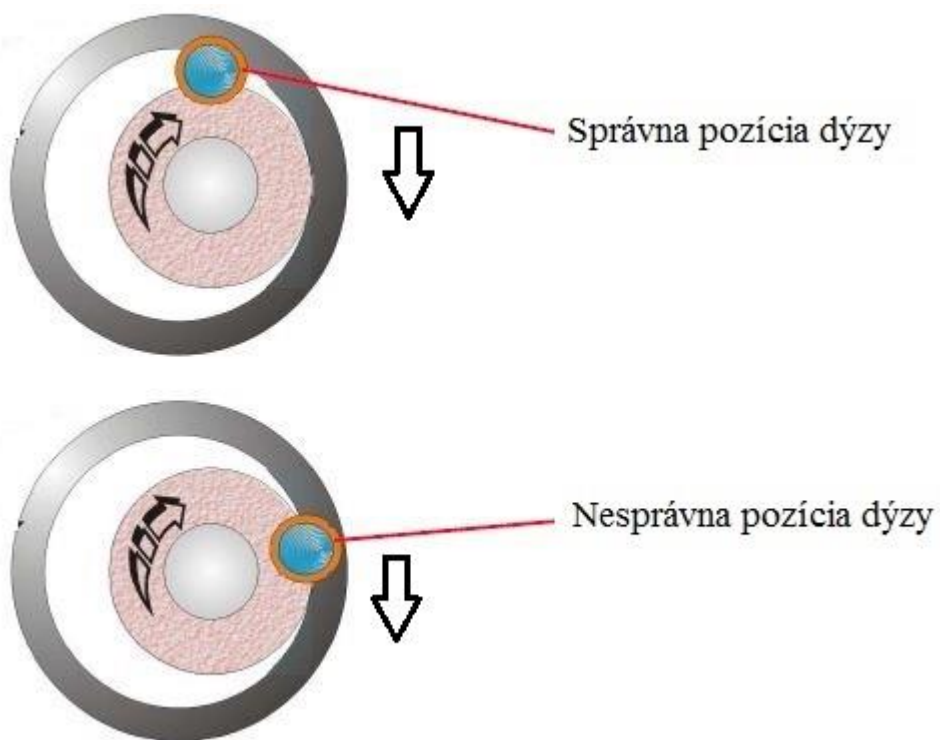
Nesprávne chladenie



Správne chladenie



Obr. 31 Nastavenie dýzy pre prívod procesnej kvapaliny [43]



Obr. 32 Pozícia dýzy pre prívod procesnej kvapaliny [43]

Tab. 4.3a Nastavené hodnoty rezných parametrov procesu brúsenia

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK Hermes
Rezná rýchlosť [m.s ⁻¹]	53	53
Otáčky [s ⁻¹]	4,7	4,7
Posuvová rýchlosť [μm.s ⁻¹]	90/80/65/10	90/80/65/10
Priemer BK D [mm]	23,5	23,5
Interval zrovnávania BK T _z [ks]	1	2
Úber materiálu pri zrovnávaní BK d _{úber} [μm]	25	25
Veľkosť intervalu využiteľného priemeru BK d _{ok} [mm]	6,5	6,5

Tab. 4.3b Namerané hodnoty technologických parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK Hermes
Drsnosť povrchu Ra [μm]	0,1 – 0,4	0,3
Priamosť [μm]	max. 3	max. 2
Kruhovitosť [μm]	max. 2,5	max. 1,5
Teplotná kompenzácia po brúsení [μm]	2 - 6	3
Životnosť BK T [ks]	260	520

Tab. 4.3c Namerané hodnoty produkčných parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK Hermes
Cyklový čas (plán) [s]	18	18
Cyklový čas (skutočný) t _c [s]	35	18
Odchýlka cyklových časov [%]	94,5	0
Počet vyrobených kusov A ₁ [ks]	3500	3500
Nepodarky B ₁ [%]	35	4

Tab. 4.3d Hodnoty ekonomických parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK Schmeier	BK Hermes
Cena BK N _{BK} [€]	1	2,5
Cena výrobku N _v [€]	3	3
Sadzba prevádzky stroja N _s [€.min ⁻¹]	0,6	0,6
Cena brúsenia 1 ks obrobku N _{ks} [€]	0,354	0,185
Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov N _n [€]	3675	420
Pomer ceny BK a životnosti BK [€.ks ⁻¹]	0,004	0,005



Obr. 33 Podávacie zariadenie pre otvorovú brúsku Novamatic 2G

4.4 Brúsenie obrobku 3

Brúsenie piestu (obrobok 3) bolo realizované na bezhrotovej brúske Jupiter metódou priebežného brúsenia. Skúmanou operáciou bolo teda brúsenie vonkajšej valcovej plochy obrobku. Na danom pracovisku v spoločnosti Schaeffler boli súčasťou výrobnéj linky dva brúsiace stroje. Prvý z nich bol určený na brúsenie nahrubo, kým nasledujúci stroj bol

použitý pre dokončovacie (jemné) brúsenie s nižším úberom materiálu obrobku. Použitá procesná kvapalina bola emulzia (4 % oleja vo vode). Pre zrovnávanie BK bol použitý jednohrotý diamantový zrovnávač. V experimentálnej časti boli porovnávané dva typy BK použité pri jemnom brúsení. Prvým z nich bol BK SG s korundovým abrazívnym zrnom. Druhým bol BK Tyrolit s abrazívnym zrnom vo forme karbidu kremíka.

Rezné parametre, ktoré boli počas realizácie experimentu nastavené, sú uvedené v tabuľke 4.4a. Otáčky BK boli prispôbené aktuálnemu priemeru BK, keďže pri zrovnávaní BK dochádza k znižovaniu priemeru BK. Hodnota otáčok bola nastavená po každom zrovnávaní BK.

Interval zrovnávania BK bol stanovený na 120 minút, avšak vplyvom rôznych faktorov počas brúsenia dochádzalo k odchýlkam tohto časového údaju v jednotkách minút.

Zrovnávací proces BK prebiehal v troch fázach. Prvou fázou bolo hrubovacie zrovnávanie, kedy dochádzalo k najväčšiemu úberu materiálu z povrchu BK. Ďalšou fázou bolo stredné zrovnávanie. Finálnou fázou zrovnávacieho procesu BK bolo jemné zrovnávanie, pri ktorom dochádzalo k veľmi malému úberu materiálu z povrchu BK (5 μm). Táto fáza zrovnávania zabezpečovala požadovanú kvalitu obrobeného povrchu.

Tab. 4.4a Nastavené hodnoty rezných parametrov procesu brúsenia

Parameter/Typ BK	BK SG	BK Tyrolit
Rezná rýchlosť v_c [m.s^{-1}]	32	32
Otáčky n [s^{-1}]	16,7 – 22,64	16,7 – 22,64
Posuvová rýchlosť [mm.s^{-1}]	18,33	23,33
Priemer BK [mm]	610	610
Interval zrovnávania BK [min]	120	120
Veľkosť intervalu využiteľného priemeru BK [mm]	160	160
Rýchlosť zrovnávania BK [mm.min^{-1}]	250	250

Tab. 4.4b Namerané hodnoty technologických parametrov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK SG	BK Tyrolit
Drsnosť povrchu R_a [μm]	0,15	0,2
Životnosť BK [deň]	90	90

Tab. 4.4c Namerané hodnoty cyklových časov pri danom BK

Parameter/Typ BK	BK SG	BK Tyrolit
Cyklový čas (skutočný) [s]	4,41	3,16

Tab. 4.4d Ceny daných BK

Parameter/Typ BK	BK SG	BK Tyrolit
Cena BK [€]	1050	1145



Obr. 34 Podávacie zariadenie pre bezhrotovú brúsku Jupiter

5 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

5.1 Obrobok 1

Prvý skúmaný obrobok bol vonkajší ložiskový krúžok z ložiskovej ocele 100CrMnSi6-4 po karbonitridizácii. Daný obrobok bol brúsený dvoma typmi BK. Prvým bol BK Schmeier s abrazívnym zrnom vo forme korundu (Al_2O_3) a keramickým spojivom. Druhý BK bol od spoločnosti 3M s abrazívnym zrnom vo forme kubického nitridu bóru (CBN) a keramickým spojivom. Skúšky prebehli na rovnakom stroji, ktorým bola otvorová brúska Novamatic 2G. Nastavenie rezných parametrov bolo uskutočnené podľa hodnôt odporúčaných výrobcom BK. Merané a vyhodnocované veličiny boli rozdelené do 3 oblastí: technologická (kvalita povrchu a presnosť rozmerov), produkčná (cyklové časy a nepodarky), ekonomická (ceny brusiva, prevádzky strojov apod.). Namerané hodnoty jednotlivých parametrov sú uvedené v tabuľkách v kapitole 4.2.

5.1.1 Hodnoty technologických parametrov

V rámci technologickej časti bolo skúmaných viacero parametrov.

5.1.1.1 Drsnosť povrchu Ra

Prvým z nich bola drsnosť povrchu po brúsení vnútorného priemeru ložiskového krúžku. Drsnosť povrchu je u ložiskových krúžkov veľmi významná, pretože dochádza k styku dvoch povrchov, čím určuje správnu funkciu samotného ložiska a jeho životnosť. Z výkresovej dokumentácie bola pre daný obrábaný povrch predpísaná hodnota R_a 0,5 μm .

BK od spoločnosti 3M dosiahol v tomto smere veľmi uspokojivé výsledky. Hodnota R_a sa pohybovala stabilne na úrovni 0,25 μm . Dôležitým faktorom bolo však dodržanie zrovnávania BK po obrobení 70 (max. 80) kusov obrobkov. Pri prekročení hodnoty 80 obrobených kusov bez zrovnania BK dochádzalo k nadmernému „nalepovaniu“ brúseného materiálu k povrchu BK. To paradoxne zapríčiňovalo menšiu hodnotu R_a , ale dochádzalo k omnoho väčšiemu tepelnému zaťaženiu obrobku v dôsledku vzniku zvýšených trecích síl medzi povrchmi obrobku a BK. Dôsledkom zvýšeného teplotného zaťaženia bol vznik tepelne ovplyvnenej vrstvy na povrchu obrobku, a tým sa znižovala životnosť daného obrobku (dochádzalo k lokálnemu popúšťaniu povrchu do určitej hĺbky a k vzniku zostatkových napätí). Na obrázkoch č. 35 a 36 je viditeľná plocha BK zanesená časticami obrábaného materiálu, ktorá vznikla nevhodne zvolenými reznými parametrami.



Obr. 35 „Zalepená“ časť BK 3M pri nevhodných rezných parametroch

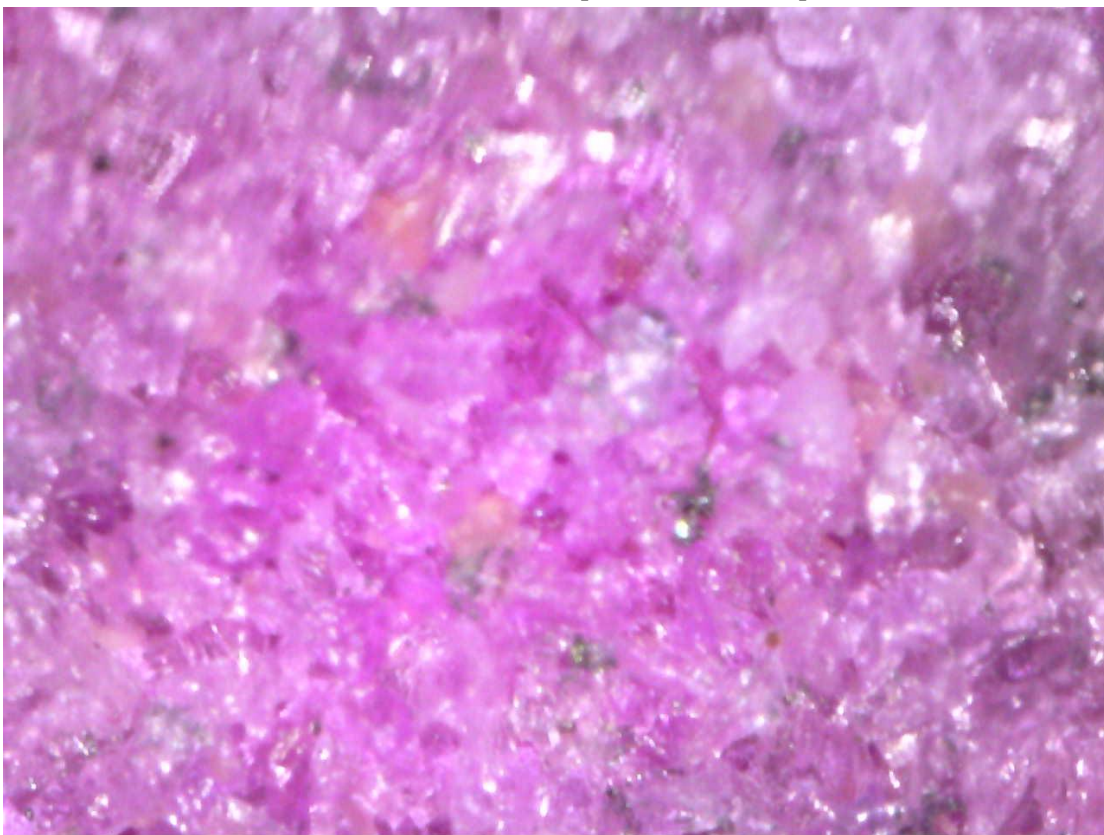


Obr. 36 Poškodený BK 3M po brúsení s nevhodne nastavenými reznými parametrami

Pri brúsení BK Schmeier nedochádzalo k uspokojivým výsledkom ako u BK 3M. Hodnota R_a sa často dostávala na hodnotu $0,15 \mu\text{m}$, čím narastala pravdepodobnosť vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy a taktiež celkového tepelného zaťaženia obrobku. Zrovnávanie BK bolo realizované po každom obrobenom kuse, čo viedlo k zníženiu riziku vzniku nadmerného tepelného namáhania obrobku, no nie k jeho eliminácii. Častým zrovnávaním sa taktiež významne znižovala životnosť BK. Z hľadiska kvality obrobeného povrchu a predovšetkým hodnoty R_a dosahoval lepšie výsledky BK od spoločnosti 3M.



Obr. 37 Štruktúra BK Schmeier pred zrovnávacím procesom



Obr. 38 Štruktúra BK Schmeier po zrovnávacom procese

Na obrázku č. 37 je stav BK po brúsení obrobku (pred zrovnávaním). Tmavé plochy nachádzajúce sa na obrázku predstavujú „nalepený“ materiál obrobku na povrchu BK. Tieto plochy strácajú abrazívne vlastnosti (nepodliehajú sa na oddeľovaní materiálu). Prichádzajú však do kontaktu s povrchom obrobku, v dôsledku čoho dochádza k nárastu teploty v mieste styku BK s obrobkom. Keďže nedochádza k oddeľovaniu materiálu, vznikajúce teplo neodchádza z miesta rezu vo forme triesky, ale hromadí sa, čím dochádza k neustálemu „nalepovaniu“ materiálu obrobku na povrch BK.

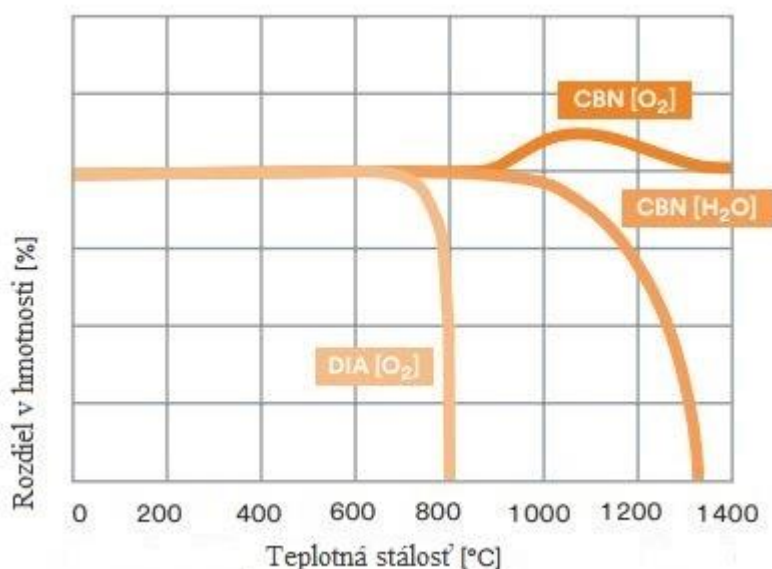
Na obrázku č. 38 je stav BK pred brúsením obrobku (po zrovnávaní). Zrovnávací proces takmer eliminoval výskyt oblastí, kde je prítomný materiál obrobku (tmavé oblasti na obrázku).

5.1.1.2 Priamosť

Ďalším skúmaným parametrom bola priamosť brúsenej plochy. Oba typy BK dosiahli uspokojivé výsledky pri brúsení, keďže hodnota priamosti pri meraní sa pohybovala v hodnotách 0,0015 – 0,002 mm.

5.1.1.3 Kruhovitosť a teplotná kompenzácia po brúsení

Nasledujúcim meraným parametrom bola kruhovitosť brúseného vnútorného priemeru ložiskového krúžku. Tento parameter úzko súvisel s ďalším skúmaným parametrom, t. j. teplotnou kompenzáciou po brúsení. Meranie kruhovitosti bolo realizované na obrobkoch dvakrát. Prvé meranie nasledovalo ihneď po brúsení (za zvýšenej teploty) a druhé po vychladnutí na teplotu okolia. Kovové materiály disponujú vlastnosťou, tzv. zmršťovaním pri chladnutí. Táto vlastnosť bola viditeľná pri meraní obrobkov brúsených oboma typmi BK. Rozdiel pri meraní kruhovitosti za zvýšenej teploty a po vychladnutí bol pri brúsení BK 3M stabilne na hodnote 4 μm . Kolísanie hodnôt teplotnej kompenzácie pri BK 3M bolo eliminované jeho vysokou teplotnou stálosťou. Teplotná stálosť pri brúsení CBN BK je vyššia ako pri použití diamantových (syntetických) BK (pozri obr. 39).



Obr. 39 Diagram teplotnej stálosti pre diamantové a CBN abrazívne zrná [44]

Pri brúsení BK Schmeier prichádzalo ku kolísaniu týchto hodnôt na úrovni 3 až 8 μm . Táto skutočnosť výrazne zvyšuje nepodarkovitosť výroby a zvyšuje nároky na obsluhu stroja, pretože sa zvyšovala náročnosť nastavenia brúsiacich parametrov. Príčinou kolísania hodnôt bolo vyššie teplotné zaťaženie obrobku pri brúsení BK Schmeier (tento BK je náchylnejší na „zalepovanie“ povrchu odoberaným materiálom).

5.1.1.4 Životnosť BK

Posledným skúmaným technologickým parametrom bola životnosť BK. Životnosť BK je výrazne ovplyvnená obrábaným materiálom, reznými podmienkami a prostredím, štruktúrou a materiálom BK. Keďže porovnávané BK disponujú rozdielnymi vlastnosťami a odlišnou štruktúrou, tak aj hodnoty životnosti boli značne odlišné.

BK Schmeier bol schopný obrobiť 600 ks obrobkov. Takto nízka hodnota životnosti bola spôsobená veľkým úberom materiálu pri zrovnávaní BK a nutnosťou zrovnávať BK po každom obrobenom kuse.

BK 3M obrobí približne 130 000 kusov obrobkov, než príde k vyčerpaniu jeho životnosti. Najväčší vplyv na tento parameter má veľmi nízka hodnota úberu materiálu zrovnávaním a taktiež interval medzi zrovnávaním BK (po 70 ks).

5.1.2 Hodnoty produkčných parametrov

Z hľadiska produktivity výroby bolo meranie zamerané na cyklové časy a nepodarkovitosť výroby. Plánovaný cyklový čas brúsenia 1 kusu ložiskového krúžku bol stanovený na hodnotu 24 s. Produkčné parametre úzko súvisia s ekonomickými ukazovateľmi a výraznou mierou ovplyvňujú výrobné zisky.

5.1.2.1 Reálny cyklový čas

Prvým meraním z hľadiska produktivity bol reálny cyklový čas. Získané hodnoty pre všetky brúsené kusy boli spriemerované, čím sa dosiahla hodnota reálnych cyklových časov. Z tabuľky 4.1c je viditeľný značný rozdiel v hodnote reálnych cyklových časov pri použití oboch BK. Pri BK Schmeier bol dosiahnutý cyklový čas na úrovni približne 31 s, zatiaľ čo u BK 3M bol dosiahnutý cyklový čas na úrovni 16,5 s. Rozdiel v cyklových časoch bol takmer 15 s, čím sa vo významnej miere zvyšuje produktivita výroby. Nameraný rozdiel v cyklových časoch bol zreteľný taktiež v počte vyrobených kusov za rovnaký časový interval. Pri brúsení BK Schmeier bolo vyrobených 640 kusov obrobkov, zatiaľ čo u BK 3M bola hodnota vyrobených kusov 1278, čo sa rovná dvojnásobnému počtu.

5.1.2.2 Nepodarky

Ďalším skúmaným parametrom bola percentuálna miera nepodarkov vzniknutých počas danej výrobnéj dávky. Pri tomto parametre taktiež dosahoval BK 3M výrazne lepšie výsledky v porovnaní s BK Schmeier. Pri BK 3M bola nepodarkovitosť na úrovni 2,2 % z celkového počtu vyrobených kusov za daný časový interval. V porovnaní s hodnotou nepodarkovitosti pri brúsení BK Schmeier, ktorá bola na úrovni 24 % z celkovej výroby, ide o významný rozdiel. Z hľadiska produkčných parametrov dosahoval BK 3M lepšie výsledky a bol využiteľnejší v sériovej výrobe.

5.1.3 Hodnoty ekonomických parametrov

5.1.3.1 Cena BK

Veľmi dôležitým faktorom z ekonomického hľadiska je cena BK, ktorá je rozhodujúca pri vstupnej investícii výrobného procesu. BK porovnávané v DP boli z dvoch rozdielnych cenových kategórií. Cena BK Schmeier sa pohybovala okolo 1,50 €, zatiaľ čo cena BK 3M bola približne 250 €.

5.1.3.2 Sadzba prevádzky stroja

Ďalším ekonomickým parametrom bola sadzba prevádzky stroja. Tento parameter má rovnakú hodnotu pre oba BK na úrovni 0,60 €/min. Tento parameter je závislý na použitom stroji, ktorý bol rovnaký pre dané meranie.

5.1.3.3 Cena brúsenia 1 ks obrobku

Nasledujúcim parametrom bola cena brúsenia 1 ks obrobku. Tento parameter má vysokú výpovednú hodnotu, pretože ukazuje dosiahnuteľný zisk pri brúsení daným BK. Cena brúsenia 1 ks obrobku pri použití BK Schmeier bola stanovená na 0,32 €. Cena brúsenia 1 ks obrobku pri použití BK 3M bola 0,17 €. Rozdiel v hodnotách je 0,15 €, čo pri sériovej výrobe (tisíciky vyrobených kusov denne) dosahuje značne rozdielne zisky.

5.1.3.4 Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov

Parameter prezentujúci vykazovanú stratu následkom výroby nepodarku. Z vypočítaných hodnôt v tabuľke 4.2d je zrejmé, že oveľa lepšie výsledky dosahoval BK 3M. Rozdiel v stratách medzi danými BK bol približne 250 € pri jednej výrobnej dávke, čo predstavuje cenu BK 3M. Z tohto vyplýva, že už pri tisíc vyrobených kusoch je takmer plná návratnosť investícií do BK tvoreného CBN abrazívnymi zrnami.

5.2 Obrobok 2

Druhým skúmaným obrobkom bol vonkajší ložiskový krúžok z antikorovej ocele X90CrMoV18. Porovnávané BK boli dva. Prvým bol BK od spoločnosti Schmeier, ktorý bol rovnaký ako pri obrobku č. 1, avšak s menším priemerom BK. Druhým bol BK od spoločnosti Hermes, ktorý má vyššiu pórovitosť a je určený pre nekalené materiály.

Pri brúsení BK Schmeier dochádzalo k pretáčaniu upnutých obrobkov, čo viedlo k vzniku nepodarkov. Nepodarky boli vyhodnotené najmä pre zhotovenie brúseného otvoru na vyššiu hodnotu ako bola predpísaná výkresovou dokumentáciou. Pre zlepšenie výsledkov bolo uskutočnené jemné brúsenie pred a po skúmanom brúsení. V tomto prípade však nedochádzalo k zlepšeniu výsledkov, pretože vznikali veľké ryhy v povrchu obrobku (spôsobené „nalepovaním“ materiálu obrobku na povrch BK, čím vznikali na povrchu BK nerovnosti) a tiež zhotovenie priemeru otvoru mimo tolerančného poľa. Z tohto dôvodu bol daný BK vyhodnotený ako nevyhovujúci pre brúsenie daného obrobku z nekalenej nerezovej ocele X90CrMoV18.

BK Hermes dosahoval počas experimentu značne lepšie výsledky, najmä z hľadiska produktivity a miery vyrobených nepodarkov. Najväčším prínosom tohto BK bola zvýšená pórovitosť štruktúry, čím sa dosiahol lepší odvod mikrotriesok z miesta rezu. Lepším odvodom mikrotriesok bolo dosiahnuté zníženie teploty v mieste rezu, a tak prišlo k takmer úplnej eliminácii vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy na obrobku. Daný materiál bol však problematický aj v tomto prípade, preto bolo zvolené jemné

brúsenie pred a po skúmanej operácii. Týmto sa dosahovali ďaleko lepšie vlastnosti povrchu obrobku a zníženie miery nepodarkov.

Nastavené rezné parametre sú uvedené v tabuľke 4.3a, namerané a vypočítané hodnoty daných skúmaných parametrov sú uvedené v tabuľkách 4.3b, 4.3c a 4.3d.

5.2.1 Hodnoty technologických parametrov

5.2.1.1 Drsnosť povrchu

Pri meraní drsnosti povrchu dochádzalo k podobným javom ako pri obrobku č. 1. Po brúsení BK Schmeier boli namerané kolísajúce hodnoty medzi 0,1 – 0,4 μm (z hľadiska integrity obrobeného povrchu je najvhodnejší interval hodnôt drsnosti povrchu R_a 0,25 – 0,35 μm), čo spĺňa hodnotu 0,5 μm stanovenú výkresovou dokumentáciou, no pri hodnote drsnosti povrchu 0,1 μm boli viditeľné tepelné poškodenia povrchu obrobku, čo vzniklo následkom zvýšených trecích síl medzi BK a povrchom obrobku (BK postupne stráca abrazívne vlastnosti). Toto kolísanie hodnôt bolo spôsobené zanášaním BK obrábanym materiálom. Pri brúsení BK Hermes boli namerané hodnoty drsnosti povrchu stabilne na 0,3 μm . Z tohto hľadiska je zrejmé, že BK Hermes dosahuje lepšie výsledky.

5.2.1.2 Priamosť, kruhovitosť, teplotná kompenzácia po brúsení

Hodnota priamosti v rámci tolerancie predpísanej výkresovou dokumentáciou bola splnená pri oboch typoch BK.

Pri hodnotách kruhovitosti a teplotnej kompenzácií po brúsení dochádzalo k rovnakým javom ako pri skúmaní obrobku č. 1. Pri brúsení BK Schmeier dochádzalo k veľmi výraznému kolísaniu hodnôt veľkosti brúseného priemeru obrobku ihneď po brúsení a po následnom vychladnutí. Príčinou bol opäť nedostatočný odvod tepla z miesta rezu. Brúsením BK Hermes dochádzalo k stabilným hodnotám teplotnej kompenzácie na úrovni 3 μm .

5.2.1.3 Životnosť BK

Pri porovnávaní životnosti daných BK bol rozhodujúci interval zrovnávania BK, keďže priemer BK a úber materiálu pri zrovnávaní bol rovnaký pri oboch typoch BK. Interval medzi zrovnávaniami BK bol u BK Schmeier po každom obrobenom kuse, BK Hermes bol zrovnávaný po dvoch obrobených kusoch. Z toho vyplýva, že v prípade BK Hermes bola životnosť dvojnásobná v porovnaní s BK Schmeier.

5.2.2 Hodnoty produkčných parametrov

Plánovaný cyklový čas výroby bol stanovený na 18 s. Nastavené rezné parametre boli rovnaké, avšak pri brúsení dochádzalo k značným rozdielom medzi použitými BK.

5.2.2.1 Reálny cyklový čas

Po obrobení výrobnej dávky (3500 ks) BK Schmeier bol reálny cyklový čas stanovený na hodnotu 35 s. V porovnaní s plánovaným cyklovým časom ide o nárast takmer o 95 %. Z tohto hľadiska je brúsenie daného materiálu týmto typom BK nevhodné.

Pri brúsení BK Hermes bol reálny cyklový čas stanovený na hodnotu 18 s. Tento čas bol zhodný s plánovaným cyklovým časom, čo predstavuje uspokojivý výsledok (nebol tu však zahrnutý čas, ktorý je potrebný na jemné brúsenie pred a po skúmanej operácii). Takto značný rozdiel v hodnotách reálnych cyklových časov bol spôsobený náročným nastavením parametrov stroja pri brúsení BK Schmeier.

5.2.2.2 Nepodarky

Nasledujúcim skúmaným parametrom bola percentuálna miera nepodarkovitosti z danej výrobnnej dávky. Po brúsení BK Schmeier dosiahla miera nepodarkovitosti hodnotu 35 %, čo predstavuje viac ako tretinu vyrobených dielov. S tým je spojená aj vysoká finančná strata, ktorá je veľmi nežiaduca.

Po brúsení BK Hermes bola miera nepodarkovitosti na úrovni 4 %. V porovnaní s BK Schmeier ide o veľmi významný rozdiel, najmä z hľadiska výsledných ziskov.

5.2.3 Hodnoty ekonomických parametrov

5.2.3.1 Cena BK

Ceny porovnávaných BK boli veľmi podobné, rozdiel v hodnotách je 1,50 €, čo je pri celkových nákladoch zanedbateľná hodnota. Z hľadiska efektivity daných BK pri obrábaní skúmaného materiálu je zrejmé, že vhodnejšia voľba je BK Hermes. Tento typ BK dosiahol vyššiu životnosť, produktivitu a celkovú ziskovosť výroby.

5.2.3.2 Sadzba prevádzky stroja

Hodnota tohto parametru zostáva rovnaká ako pri obrábaní obrobku č. 1, pretože obrábanie obrobku č. 2 bolo realizované na rovnakom stroji Novamatic 2G.

5.2.3.3 Cena brúsenia 1 ks obrobku

Hodnota bola vypočítaná z nameraných hodnôt pomocou vzťahu 3 v časti 4.2. Náklady pre obrobenie 1 ks obrobku boli v prípade BK Schmeier na úrovni 0,354 €. Pre BK Hermes bola vypočítaná hodnota 0,185 €. Rozdiel v hodnotách je 0,169 €. Táto hodnota je v prípade sériovej výroby smerodajná, keďže určuje ziskovosť výroby. Z tohto hľadiska je BK Hermes vhodnejšou voľbou pre obrábanie daného materiálu.

5.2.3.4 Hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov

Nasledujúca hodnota bola vypočítaná zo vzťahu 4 v časti 4.2. Z výrobnnej dávky 3500 ks bolo v prípade BK Schmeier 35 % nepodarkov, čo predstavuje 1225 ks. Keďže hodnota obrobeného kusu je 3 €, strata v tomto prípade je na úrovni 3675 €. V prípade BK Hermes bolo z výrobnnej dávky 3500 ks 4 % nepodarkov, čo predstavuje 140 ks nepodarkov. Hodnota straty je na úrovni 420 €. Pri danej výrobnnej dávke bola úspora z hľadiska nepodarkovitosti na úrovni 3255 €, v prípade, že bol použitý BK Hermes. V sériovej výrobe je daná hodnota rozdielu významná.

5.3 Obrobok 3

Pre brúsenie piestu z antikorovej ocele X90CrMoV18 bol použitý BK SG a BK Tyrolit. BK sa líšia typom spojiva a štruktúrou. Rezné parametre použité pri realizácii experimentálnej časti sú uvedené v tabuľke 4.4a. Rozdiel medzi skúmanými BK je v hodnote posuvovej rýchlosti brúsenia. Pri priebežnom bezhrotovom brúsení hodnota posuvovej rýchlosti výrazne ovplyvňuje produktivitu výrobného procesu.

Hodnota posuvovej rýchlosti pre BK SG bola $18,33 \text{ mm.s}^{-1}$. Pri zvýšení danej hodnoty dochádzalo k výrobe nepodarkov. Pre BK Tyrolit bola hodnota posuvovej rýchlosti $23,33 \text{ mm.s}^{-1}$. Rozdiel v hodnotách posuvovej rýchlosti medzi použitými BK bola 5 mm.s^{-1} .

Cyklový čas je nepriamo úmerný hodnote posuvovej rýchlosti. Pri brúsení BK SG bol nameraný čas výroby jedného kusu obrobku 4,41 s. Pri brúsení BK Tyrolit bola táto hodnota na úrovni 3,16 s. Rozdiel v produktivite počas 8-hodinovej smeny bol približne 2 000 ks. Pre sériovú výrobu je rozdiel v ziskovosti daného výrobného procesu v tisíckach eur denne.

Priemerná hodnota drsnosti povrchu pri brúsení BK SG bola na úrovni 0,15 μm . Pri brúsení BK Tyrolit bola nameraná priemerná hodnota drsnosti povrchu na úrovni 0,2 μm . Z hľadiska integrity povrchu boli dosiahnuté takmer rovnaké výsledky pre oba skúmané BK.

Životnosť BK pri priebežnom brúsení povrchu je pomerne vysoká. Pre oba typy skúmaných BK je hodnota životnosti na úrovni 90 dní.

Cena daných BK je na podobnej úrovni. Cena BK Tyrolit je o 95 € vyššia v porovnaní s cenou BK SG. Z hľadiska produktivity je však pre daný obrábaný materiál vhodnejšou voľbou BK Tyrolit.

ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá rozdelením TOM a dokončovacími technológiami obrábania, predovšetkým brúsením. Experimentálna časť porovnáva dva druhy BK pri brúsení obrobku z daného materiálu. Cieľom bolo stanovenie vhodného typu BK pri vhodných rezných parametroch z ekonomicko-produkčného hľadiska.

Pre brúsenie obrobku 1 s karbonitridovaným povrchom bol použitý BK Schmeier s abrazívnym zrnom vo forme korundu a BK 3M s CBN abrazívnym zrnom. Z experimentálnej časti je zrejmé, že lepších výsledkov dosahoval BK 3M. Pri použití BK 3M bola dosiahnutá lepšia integrita povrchu obrobku (stabilná Ra na úrovni $0,25\text{ }\mu\text{m}$, čím je čiastočne eliminovaná tepelne ovplyvnená povrchová vrstva na obrobku), produktivita (dvojnásobný počet vyrobených kusov za pracovnú smenu) a taktiež ziskovosť výroby (vyššie zisky v stovkách eur za pracovnú smenu). Tento typ BK je však vhodný najmä pre sériovú výrobu, nakoľko obstarávacie náklady pre tento typ BK sú oveľa vyššie (cena BK 3M je približne 150-krát vyššia).

Obrobok 2 z antikorovej ocele bol brúsený pomocou BK Schmeier, ktorý bol použitý aj pri brúsení obrobku 1 a BK Hermes s abrazívnym zrnom vo forme korundu. BK Hermes mal rovnaký typ abrazívneho zrna ako BK Schmeier, no štruktúra BK je rozdielna. Hlavným rozdielom medzi skúmanými BK bola vyššia pórovitosť u BK Hermes. Vďaka tomuto faktoru dosahoval BK Hermes lepších výsledkov v porovnaní s BK Schmeier. Životnosť BK Hermes bola vyhodnotená na 520 ks, čo predstavuje dvojnásobnú hodnotu v porovnaní s BK Schmeier (260 ks). Významný rozdiel je v nepodarkovitosti výroby. Pri použití BK Hermes bolo dosiahnuté zníženie nepodarkovitosti výroby o 31 %, čím sa znížili aj finančné straty výroby o 3255 € v porovnaní s BK Schmeier. Rozdiel v cene porovnávaných BK je 1,5 €.

Pri priebežnom brúsení obrobku 3 boli vyhodnocované cyklové časy pri použití daných BK. BK Tyrolit dosiahol cyklového času na úrovni 3,16 s, BK SG dosiahol cyklového času na úrovni 4,41 s. Skúmaným parametrom bola posuvová rýchlosť priebežného brúsenia, nakoľko tento parameter výrazne ovplyvňuje produktivitu výroby. Pri použití BK Tyrolit bola dosiahnutá vyššia posuvová rýchlosť o $5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v porovnaní s BK SG. Hodnoty posuvových rýchlostí pri daných BK sú maximálne, nakoľko pri ich dodatočnom zvýšení nedochádzalo k naplneniu požiadaviek z hľadiska integrity povrchu. Cena daných BK je podobná (1050 € BK SG; 1145 € BK Tyrolit), čím sú aj celkové obstarávacie náklady na podobnej úrovni. Z poznatkov získaných z experimentálnej časti je z hľadiska produktivity vhodnejšou voľbou BK Tyrolit.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255s. ISBN 80-214-2374-9.
3. BRIAN ROWE, W. Principles of modern grinding technology. *Introduction*, 2009, s. 1 – 14.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815520184500070>
4. LISHU, L.; ZHAOHUI, D.; TAO, L.; ZHONGYANG, L.; WEI, L. Intelligent technology in grinding proces driven by data: A review. *Journal of materials processing technology*, 2020, s. 1039 – 1051.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520306071>
5. ČEP, R.; PETRŮ, J. Broušení a dokončovací technologie obrábění. *Technologie obrábění*, 2013.
http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2005%20Brou%C5%A1en%C3%AD%20a%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20operace%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
6. SWAGATA, B.; RUDRA, N. Selection of abrasive materials for manufacturing grinding wheels. *MaterialsToday: Proceedings*, 2018, s. 2860 – 2864.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318300877>
7. Broda, J.; 3M Abrasive Systems Division. *Úvod k využití PSG v precizním broušení*, 2014, (katalog).
8. TOSHIO, K. Lapping and polishing technology. *Handbook of advanced ceramics*, 2003, s. 611 – 627.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780126546408500171>
9. LIN, B.; JIANG, X-M.; CAO, Z-C.; HUANG, T.; LI, K. Theoretical and experimental analysis of material removal and surface generation in novel fixed abrasive lapping of optical surface. *Journal of materials processing technology*, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619305436>
10. Lapování. <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1385>
11. MURATOV, K. R.; GASHEV, E. A.; ABLYAZ, T. R.; SIDHU, S. S. Formation of the roughness during honing with raster kinematic of the tool. *MaterialsToday: Proceedings*, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320359964>
12. KAI, M.; XIJING, Z.; XUELIANG, C.; JIANQING, W.; RUIEN, Y.; LONGYONG, X.; MAZIN, A.; LINZHENG, Y.; XIANGMENG, L.

Experimental investigation on surface quality in ultrasonic-assisted honing of 304 stainless steel. *Precision Engineering*, 2020, s. 148 – 158.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635919303198>

13. UHLMANN, E.; SPUR, G.; KLEINSCHNITKER, M. Honing and superfinishing. *Handbook of ceramics grinding and polishing (second edition)*, 2015, s. 234 – 262.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455778584000054>

14. GRZESIK, W.; ZAK, K. Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations. *Journal of materials processing technology*, 2012, s. 315 – 322.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611002767>

15. MIKOLAJCZYK, T.; FAS, T.; KLODOWSKI, A.; MATUSZEWSKI, M.; OLARU, A.; OLARU, S. Computer aided system for superfinishing process control. *Procedia technology*, 2016, s. 48 – 54.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316000098>

16. Superfinišování. <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1386>

17. BHATTACHARYYA, B.; DOLOI, B. Advanced finishing processes. *Modern machining technology*, 2020, s. 675 – 743.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128947000086>

18. MANJUNATH, M. A.; VINOD, P.; BALASHANMUGAM, N.; SANKAR, M. R. Abrasive flow finishing for surface roughness improvement of aluminium propeller: A case study. *MaterialsToday: Proceedings*, 2020, s. 1113 – 1118.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320309767>

19. Abrasive flow machining. <https://www.machinemfg.com/abrasive-flow-machining/>

20. MAO, M.; CHEN, W.; LIU, J.; HU, Z.; QIN, C. Chemical mechanism of chemical mechanical polishing of tungsten cobalt cemented carbide inserts. *International journal of refractory metals and hard materials*, 2020.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436819308832>

21. SINGH, M.; SINGH, A. K. Magnetorheological finishing of variable diametric external surface of the tapered cylindrical workpieces for functionality improvement. *Journal of manufacturing processes*, 2021, s. 153 – 172.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661252030757X#fig0005>

22. YAMAMURA, K.; TAKIGUCHI, T.; UEDA, M.; DENG, H.; HATTORI, A. N.; ZETTSU, N. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface. *CIRP annals*, 2011, s. 571 – 574.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611000734>

23. KOCMAN, K. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
24. SALES, W. F.; SCHOOP, J.; SILVA, L. R. R.; MACHADO, A. R.; JAWAHIR, I. S. A review of surface integrity in machining of hardened steels. *Journal of manufacturing processes*, 2020, s. 136 – 162.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520304667>
25. GURPREET, S.; VIVEK, A.; SEHIJPAL, S. An outlook on the sustainable machining aspects of minimum quantity lubrication during processing of difficult to cut materials. *MaterialsToday: Proceedings*, 2020, s. 1592 – 1598.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320335951>
26. SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials. *International journal of machine tools and manufacture*, 2010, s. 663 – 680.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695510000738>
27. GUZANOVÁ, A.; DRAGANOVSKÁ, D. Štruktúra a vlastnosti materiálov. *Návody do cvičenia*, 2015.
https://www.sjf.tuke.sk/kstam/images/E_materialy/Cast_II_Struktura-a-vlastnosti-materialov_navody-na-cvicenia.pdf
28. VĚCHET, S.; NĚMEC, K. Tepelné zpracování ocelí.
<https://www.slideserve.com/laksha/tepeln-zpracov-n-ocel-druhy-a-zp-soby>
29. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
30. DRIML, B. *Kalení a popouštění*.
<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
31. ISO M Korozivzdorné oceli. *Sandvik coromant*, 2000-2011.
https://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
32. Korozivzdorné oceli – vlastnosti.
http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
33. Nikl a jeho slitiny Titan a jeho slitiny. Západočeská univerzita v Plzni, 2009.
https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
34. KALANTARI, O.; JAFARIAN, F.; FALLAH, M. M. Comparative investigation of surface integrity in laser assisted and conventional machining of Ti-6Al-4 V alloy. *Journal of manufacturing processes*, 2021, s. 90 – 98.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520308197>
35. <https://tmstitanium.com/titanium-and-the-aerospace-industry/>

36. <https://cz.depositphotos.com/7246756/stock-photo-knee-and-titanium-hinge-joint.html>
37. BARTHELMA, F.; FRANK, H.; SCHIFFLER, M.; BARTSCH, A. Hard coatings to improve the machining of nickel based materials. *Procedia CIRP*, 2016, s. 294 – 298.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116302566>
38. GRZESIK, W., NIESŁONY, P.; HABRAT, W.; SIENIAWSKI, J.; LASKOWSKI, P. Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process performance and productivity enhancement. *Tribology international*, 2018, s. 337 – 346.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17304656>
39. <https://www.semanticscholar.org/paper/On-some-advanced-nickel-based-superalloys-for-disk-Locq-Caron/0857ac5206221d50546dc4df97851f25b1e2edb2/figure/1>
40. <https://matmatch.com/blog/the-future-of-high-temperature-materials-for-gas-turbines/>
41. <https://www.meccanicanova.com/en/cnc-grinding-machines/internal-grinding/novamatic-2g/>
42. <https://www.junker-group.com/cs/broušici-stroje/products/jupiter/>
43. Prezentácia firmy Schaeffler, spol. s r.o.. Teória procesu brúsenia.
44. 3M (online katalóg); 3M Precision Grinding & Finishing. *3M Diamond & CBN Tools*, 2018.
<https://multimedia.3m.com/mws/media/1548243O/brochure-3m-diamond-cbn-tools-view-file.pdf>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Opis
BK	brúsiaci kotúč
CBN	kubický nitrid bóru (Cubical boron nitride)
HRC	tvrdosť podľa Rockwella
TOM	ťažko obrobiteľný materiál
MKK	medzikryštalická korózia
SG	Saint Gobain

Symbol	Jednotka	Opis
R_a	[μm]	stredná aritmetická hodnota drsnosti povrchu
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	rezná rýchlosť
π	[-]	Ludolfovo číslo
D	[mm]	priemer BK
n	[s^{-1}]	otáčky vretena
T_z	[ks]	interval zrovnávania
d_{úber}	[μm]	veľkosť úberu materiálu pri zrovnávaní BK
d_{ok}	[mm]	veľkosť intervalu využiteľného priemeru BK
T	[ks]	životnosť BK
N_{ks}	[$\text{€} \cdot \text{ks}^{-1}$]	cena brúsenia 1 ks obrobku
t_c	[s]	reálny cyklový čas
N_s	[$\text{€} \cdot \text{min}^{-1}$]	sadzba prevádzky stroja
N_{BK}	[€]	cena BK
N_n	[€]	hodnota straty vplyvom výroby nepodarkov
B₁	[%]	podiel nepodarkov z výrobnéj dávky
A₁	[ks]	výrobná dávka
N_v	[€]	cena výrobku

